



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**RELOKASI HIPOCENTER GEMPA BUMI  
MENGUNAKAN METODE *COUPLED  
VELOCITY-HYPOCENTER* DAN *LOCAL  
EARTHQUAKE TOMOGRAPHY* UNTUK SESAR  
PALU KORO**

**MARIA FRANSISCA GRACYNTHIA  
NRP.1111100040**

**Dosen Pembimbing  
Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2015**

**FINAL PROJECT - SF 141501**

**HYPOCENTER RELOCATION OF EARTHQUAKE  
USING COUPLED VELOCITY-HYPOCENTER  
METHOD AND LOCAL EARTHQUAKE  
TOMOGRAPHY IN PALU KORO FAULT**

**MARIA FRANSISCA GRACYNTHIA  
NRP.11111100040**

**Advisor Lecturer  
Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa,S.U.**

**PHYSICS DEPARTMENT  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2015**

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI  
MENGUNAKAN METODE *COUPLED VELOCITY-  
HYPOCENTER* DAN *LOCAL EARTHQUAKE  
TOMOGRAPHY* UNTUK SESAR PALU KORO**

**TUGAS AKHIR**

Disusun Oleh :

**MARIA FRANSISCA GRACYNTHIA  
NRP. 1111100040**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

**Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S. U.....**



**RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI  
MENGUNAKAN METODE *COUPLED VELOCITY-  
HYPOCENTER* DAN *LOCAL EARTHQUAKE  
TOMOGRAPHY* UNTUK SESAR PALU KORO**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Pada Bidang Studi Fisika Bumi Program Studi S-1  
Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Disusun Oleh :

**MARIA FRANSISCA GRACYNTHIA**  
**NRP. 1111100040**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA  
2015**

# **RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MENGUNAKAN METODE *COUPLED VELOCITY- HYPOCENTER* DAN *LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY* UNTUK SESAR PALU KORO**

**Nama** : Maria Fransisca Gracynthia  
**NRP** : 1111100040  
**Pembimbing** : Prof.Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.

## **Abstrak**

Telah dilakukan penelitian mengenai relokasi hiposenter gempa bumi menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* dan metode *local earthquake tomography*. Lokasi penelitian berada di daerah sekitar Sesar Palu Koro, Sulawesi. Dalam metode *coupled velocity-hypocenter* ini menggunakan prinsip metode Geiger dan didapatkan lokasi baru hiposenter gempa bumi, model kecepatan baru, dan koreksi stasiun dari daerah penelitian. Sedangkan dari metode *local earthquake tomography* akan didapatkan rekonstruksi struktur bawah permukaan bumi dengan menggunakan *waveform* dan *travel time* dari gelombang gempa bumi. Hasil yang didapatkan menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* adalah terjadi liniasi yang lebih baik dan sumber gempa bumi terkelompok. Sedangkan hasil yang didapatkan dari metode *local earthquake tomography* adalah distribusi hiposenter gempa bumi secara umum terdapat pada kedalaman 20 kilometer hingga 40 kilometer.

Kata kunci: *coupled velocity-hypocenter*, *local earthquake tomography*, relokasi

# **HYPOCENTER RELOCATION OF EARTHQUAKE USING COUPLED VELOCITY-HYPOCENTER METHOD AND LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY METHOD IN PALU KORO FAULT**

**Name : Maria Fransisca Gracynthia**

**NRP : 1111100040**

**Advisor Lecture : Prof Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S. U.**

## ***Abstract***

Research has been performed about hypocenter relocation of earthquakes using coupled velocity-hypocenter method and local earthquake tomography method. The location of research is in the area around Palu Koro Fault, Sulawesi. Coupled velocity-hypocenter method using the principle of Geiger method and get the new location of earthquake hypocenter, the new velocity model, and correction stations of regional research. Whereas local earthquake tomography method will get reconstruction of subsurface structure by using waveform and travel time of seismic waves. Results obtained from velocity-coupled hypocenter method is have a better continuity of earthquake event and the earthquakes are clustered. Whereas the results obtained from local earthquake tomography method is the distribution of earthquake hypocenter in general are at a depth of 20 kilometers to 40 kilometers.

**Keywords:** coupled velocity-hypocenter, local earthquake tomography, relocation

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode *Coupled Velocity-Hypocenter* dan *Local Earthquake Tomography* untuk Sesar Palu Koro**”. Adapun tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai syarat untuk menyelesaikan program studi Strata – 1 di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Berbagai daya, upaya dan perjuangan turut mewarnai dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Akhirnya dengan segala semangat yang dimiliki dan dukungan dari berbagai pihak maka tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini, telah banyak daya, upaya, dan perjuangan yang dilakukan oleh penulis. Atas bantuan, dorongan dan juga bimbingan dari berbagai pihak maka akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Sehubungan dengan hal tersebut maka pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus, Papa, Mama, Nenek serta Andre yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Prof. Dr. Rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S. U., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
3. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng, selaku Ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Faridawati, M.Si, selaku sekretaris program studi S1 Jurusan Fisika FMIPA ITS.
5. Endarko, M.Si, Ph.D, selaku dosen wali penulis.

6. Agus Purwanto, D.Sc dan Sungkono, M.Si, selaku dosen penguji yang memberikan pengarahannya yang sangat bermanfaat bagi penulis.
7. Website webdc, dimana data untuk penelitian ini didapatkan.
8. PT. Reka Bumi, khususnya Bapak Sigit, yang telah memberikan peta untuk penelitian ini.
9. Teman-teman Fisika angkatan 2011, atas kekeluargaannya selama ini yang selalu terjalin.

Penulis berharap laporan penelitian Tugas Akhir ini nantinya akan dapat berguna dan dapat dimanfaatkan dengan baik sebagai referensi bagi yang membutuhkan serta menjadi sarana pengembangan kemampuan ilmiah bagi semua pihak yang bergerak dalam bidang yang berhubungan dengan Fisika, khususnya Geofisika.

Surabaya, Januari 2015

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	i
<b>HALAMAN JUDUL</b>	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	iv
<b>ABSTRAK</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vi
<b>KATA PENGANTAR</b>	vii
<b>DAFTAR ISI</b>	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xi
<b>DAFTAR TABEL</b>	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	xiv
 <b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah/ Ruang Lingkup Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
 <b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Gempa Bumi	5
2.2 Struktur Tektonik Pulau Sulawesi	10
2.3 Sesar Palu Koro	11
2.4 Metode <i>Coupled Velocity-Hypocenter</i>	13
2.5 Metode <i>Local Earthquake Tomography</i>	16
 <b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Alat dan Bahan	19
3.2 Proses Pengambilan Data	19
3.3 Proses Pengolahan Data	19
3.3.1 Pengumpulan data dari PRS	19

3.3.2 <i>Picking</i> gelombang P dan S	20
3.3.3 Penentuan lokasi awal hiposenter	20
3.3.4 Pengolahan data menggunakan VELEST	20
3.3.5 Relokasi posisi hiposenter	24
3.3.6 Pengolahan data menggunakan LOTOS	25
3.4 Diagram Pengolahan Data	28
 <b>BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode <i>Coupled Velocity-Hypocenter</i>	31
4.2 Pengolahan Data Hasil Relokasi Menggunakan Metode <i>Local Earthquake Tomography</i>	39
 <b>BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
 <b>DAFTAR PUSTAKA</b>	51
<b>LAMPIRAN</b>	53
<b>Biodata Penulis</b>	61

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mekanisme terjadinya gempa bumi	6
Gambar 2.2	Penjalaran gelombang P	8
Gambar 2.3	Penjalaran gelombang S	8
Gambar 2.4	Peta tektonik dan struktur Sulawesi	12
Gambar 2.5	Diagram alir <i>software</i> VELEST	15
Gambar 2.6	Diagram alir <i>software</i> LOTOS	17
Gambar 3.1	<i>Input</i> stasiun dalam <i>software</i> VELEST	21
Gambar 3.2	<i>Input</i> data gempa bumi dalam <i>software</i> VELEST	21
Gambar 3.3	<i>Input velocity model</i> dalam <i>software</i> VELEST	22
Gambar 3.4	<i>Input</i> parameter kontrol dalam <i>software</i> VELEST	23
Gambar 3.5	<i>Input</i> data gempa bumi dalam <i>software</i> LOTOS	26
Gambar 3.6	<i>Input</i> lokasi stasiun dalam <i>software</i> LOTOS	26
Gambar 3.7	<i>Input</i> model kecepatan dalam <i>software</i> LOTOS	27
Gambar 3.8	<i>Input</i> parameter kontrol dalam <i>software</i> LOTOS	27
Gambar 3.9	Diagram alir penelitian	29
Gambar 4.1	Hiposenter gempa bumi sebelum relokasi	33
Gambar 4.2	Hiposenter gempa bumi setelah relokasi	34
Gambar 4.3	Perbandingan lokasi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi	36
Gambar 4.4	Grafik model kecepatan daerah Sesar Palu Koro	38
Gambar 4.5	Distribusi sebaran gempa bumi dan stasiun pengamat	40
Gambar 4.6	<i>Cross section</i> daerah penelitian	41
Gambar 4.7	Hasil kecepatan gelombang P terhadap kedalaman; (a) <i>section 1</i> , (b) <i>section 2</i>	41
Gambar 4.8	Hasil kecepatan gelombang S terhadap kedalaman; (a) <i>section 1</i> , (b) <i>section 2</i>	42

Gambar 4.9	Irisan horizontal untuk gelombang P; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km	43
Gambar 4.10	Irisan horizontal untuk gelombang S; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km	43
Gambar 4.11	Irisan horizontal untuk Vp/Vs; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km	44
Gambar 4.12	Anomali gelombang P; (a) <i>section 1</i> , (b) <i>section 2</i>	45
Gambar 4.13	Anomali gelombang S; (a) <i>section 1</i> , (b) <i>section 2</i>	45
Gambar 4.14	Anomali Vp/Vs; (a) <i>section 1</i> , (b) <i>section 2</i>	46
Gambar B.1	Sebaran gempa bumi serta lokasi stasiun	59
Gambar B.2	Contoh <i>picking</i> gelombang gempa bumi	59

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hubungan antara magnitudo dan intensitas gempa	10
Tabel 3.1	Model awal kecepatan untuk daerah Sesar Palu Koro	24
Tabel 4.1	Lokasi stasiun pengamat gempa bumi	31
Tabel 4.2	Model kecepatan sesudah relokasi	37
Tabel 4.3	Koreksi stasiun setelah dilakukan relokasi	39
Tabel A.1	Data lokasi awal gempa bumi	53
Tabel A.2	Hasil relokasi gempa bumi	55
Tabel A.3	Perbandingan <i>latitude</i> , <i>longitude</i> , dan <i>depth</i> hiposenter gempa bumi sebelum dan sesudah relokasi	57

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Hasil Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode <i>Coupled Velocity- hypocenter</i>	53
Lampiran B	Gambar Pendukung dalam Penelitian	59

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia terletak pada tiga lempeng besar (lempeng mayor) di dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik selain itu juga terdapat lempeng minor, lempeng Philipina. Hal tersebut menyebabkan Indonesia berada pada daerah rawan gempa bumi dan banyak letusan gunung api. Zona tektonik di Indonesia sangatlah aktif yang disebabkan oleh pertemuan lempeng-lempeng dan membentuk jalur-jalur pertemuan yang sangat kompleks.

Dampak yang disebabkan karena adanya gempa bumi pun juga cukup besar. Dampak-dampak tersebut adalah bangunan roboh, kebakaran, permukaan tanah menjadi retak, tanah longsor yang terjadi akibat adanya guncangan, dan gempa di dasar laut yang menyebabkan tsunami. Upaya mitigasi secara optimal perlu dilakukan untuk meminimalisir adanya dampak bencana yang terjadi. Upaya yang dapat dilakukan adalah penelitian ilmu kebumihan dengan relokasi hiposenter gempa bumi.

Relokasi hiposenter gempa merupakan suatu metode yang bertujuan untuk memperoleh hiposenter yang lebih baik dan akurat. Dengan dilakukannya relokasi, maka akan terlihat liniasi atau kemenerusan hiposenter yang merepresentasikan struktur sesar di bawah permukaan bumi. Metode relokasi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah metode *coupled velocity-hypocenter* dengan menggunakan program VELEST (Kissling, 1995). Dari metode tersebut nantinya akan dihasilkan posisi relokasi gempa bumi yang baru, penentuan model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan 1D, dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger.

Selain itu, dalam penelitian tugas akhir ini juga digunakan metode *Local Earthquake Tomography*, untuk mendapatkan kondisi bawah permukaan kondisi bawah permukaan dari daerah

penelitian. Data hasil relokasi khususnya lokasi hiposenter yang lebih tepat, akan di *plot* pada tomografi daerah penelitian.

Sesar Palu-Koro merupakan sesar mendatar (*strike-slip fault*) karena berdekatan dengan jalur pertemuan tiga lempeng mayor dan satu lempeng minor. Daerah tersebut memiliki aktifitas kegempaan yang cukup tinggi dengan kedalaman sekitar 0 kilometer hingga 60 kilometer. (Budiati, 2012)

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka dapat dirumuskan permasalahannya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil relokasi hiposenter gempa bumi dengan menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter*?
2. Bagaimana model bumi dengan struktur kecepatan P dan S yang didapatkan dari metode *Local Earthquake Tomography*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan relokasi hiposenter gempa bumi dengan menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* pada program VELEST serta *Local Earthquake Tomography* pada program LOTOS. Studi kasus yang diambil adalah gempa bumi pada daerah Sesar Palu Koro dengan menggunakan data dari tahun 2007 hingga 2013.

## 1.4 Batasan Masalah/ Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup masalah dalam Tugas Akhir ini adalah (1) metode yang digunakan adalah metode *coupled velocity-hypocenter* dan metode *Local Earthquake Tomography* (2) program yang digunakan untuk metode *coupled velocity-hypocenter* adalah VELEST dan untuk metode *Local Earthquake Tomography* adalah LOTOS serta program yang digunakan untuk *plotting* posisi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi menggunakan ArcGis10.1 (3) Data gempa bumi diambil dari [webdc.eu/webdc3](http://webdc.eu/webdc3) dari tahun 2007 hingga 2013.



### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah memberikan informasi mengenai gempa-gempa yang terjadi di sekitar Sesar Palu Koro yang nantinya akan merepresentasikan liniiasi dari Sesar Palu Koro.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Bab I – Pendahuluan, berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan laporan penelitian.
2. Bab II – Tinjauan Pustaka, berisi uraian mengenai teori yang mendukung analisis.
3. Bab III – Metodologi Penelitian, berisi alat dan bahan, data penelitian, *software* yang digunakan dalam penelitian, serta uraian mengenai metode-metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian.
4. Bab IV – Analisa Data dan Pembahasan, menjelaskan tentang hasil-hasil yang didapat dari pengerjaan pada penelitian ini, yaitu hiposenter gempa sebelum dan sesudah relokasi serta perbandingan *latitude*, *longitude*, dan *depth* baik sebelum relokasi maupun sesudah relokasi, serta tomografi dari gempa bumi yang terjadi.
5. Bab V – Penutup, berisi uraian mengenai kesimpulan dari hasil analisa data dan pembahasan serta saran-saran yang digunakan untuk mendukung penelitian selanjutnya.
6. Lampiran, berisi data – data yang digunakan dalam penelitian beserta beberapa gambar yang menunjang penelitian ini.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## **BAB II**

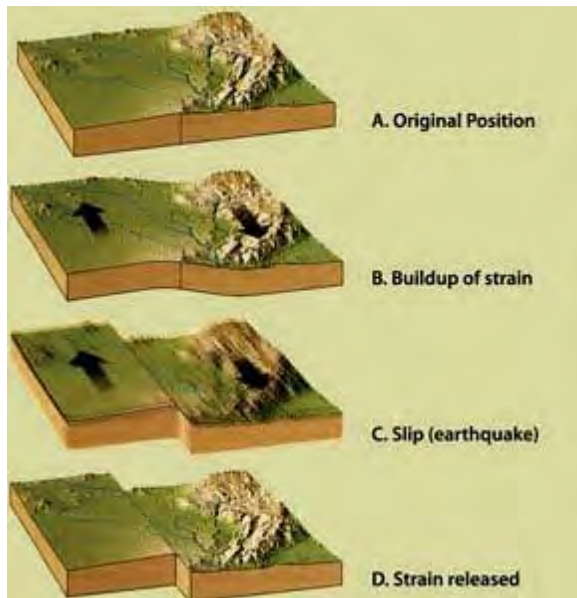
### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gempa Bumi**

Gempa bumi merupakan peristiwa bergetarnya bumi yang diakibatkan dengan adanya pelepasan energi dari dalam bumi secara tiba-tiba, ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Energi yang terakumulasi tersebut menjadi penyebab terjadinya gempa bumi yang dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan tersebut dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi. Sebagai akibatnya, gelombang gempa bumi dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi hingga radius tertentu. Luas daerah yang terkena pengaruh dari terjadinya gempa bumi bergantung pada besarnya energi yang dilepaskan serta posisi hiposenter gempa bumi. Karakteristik gempa bumi adalah sebagai berikut:

- Berlangsung dalam waktu yang sangat singkat.
- Lokasi kejadian tertentu.
- Akibatnya dapat menimbulkan bencana.
- Berpotensi terulang lagi.
- Belum dapat diprediksi.
- Tidak dapat dicegah, tetapi akibat yang ditimbulkan dapat dikurangi. ([www.bmkg.go.id](http://www.bmkg.go.id))

Ketika mengalami tumbukkan di zona tumbukan (subduksi), lempeng samudera yang mempunyai rapat massa lebih besar daripada lempeng benua, maka lempeng samudera akan menyusup ke bawah. Gerakan lempeng itu akan mengalami perlambatan karena adanya gesekan selubung bumi. Sebagai akibatnya, maka akan terjadi penumpukkan energi di zona subduksi dan zona patahan, ditandai dengan terjadinya tekanan, tarikan, dan geseran. Ketika batas elastisitas suatu lempeng terlampaui, maka akan terbentuk patahan batuan dengan diikuti lepasnya energi secara tiba-tiba. Proses tersebut akan menimbulkan getaran partikel ke segala arah yang disebut gelombang gempa bumi.



Gambar 2.1. Mekanisme terjadinya gempa bumi (Tarbuck & Lutgen, 2001)

Berdasarkan penyebab terjadinya, gempa bumi dapat dibagi menjadi tiga tipe, yaitu gempa bumi runtuh (*collapse earthquake*), gempa bumi buatan, dan gempa bumi vulkanik (*volcanic earthquake*).

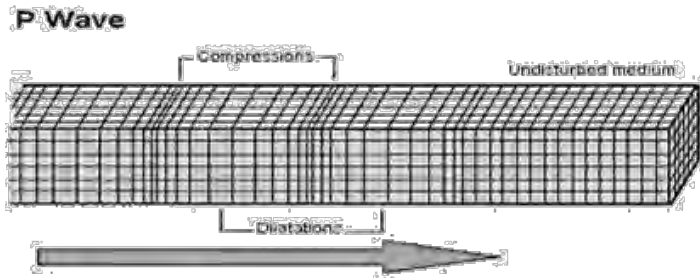
Menurut Mogi (1967), pola umum gempa bumi dibedakan dalam tiga tipe:

- a. Tipe I, yaitu gempa bumi utama (*main shock*) terjadi tanpa didahului oleh gempa bumi pendahuluan (*fore shock*), namun diikuti oleh banyak gempa bumi susulan (*after shock*). Gempa bumi tipe ini umumnya terjadi di daerah yang mempunyai medium homogen dengan stress yang bekerja hampir merata. Sebagian besar gempa bumi tektonik yang terjadi di bumi tergolong jenis ini.
- b. Tipe II, yaitu sebelum terjadi gempa bumi utama (*main*

*shock*), akan didahului oleh gempa pendahuluan dan kemudian diikuti dengan adanya gempa susulan yang cukup banyak. Gempa bumi tipe ini terjadi pada daerah dengan struktur batuan yang tidak seragam dengan distribusi stress yang bekerja juga tidak seragam.

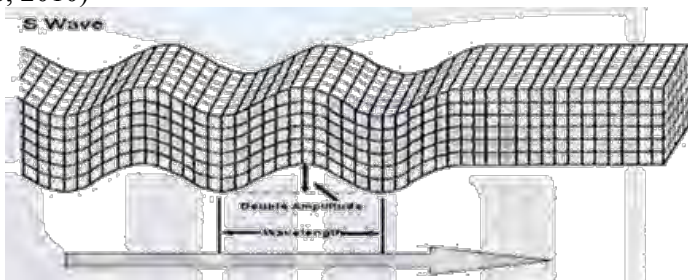
- c. Tipe III, yaitu gempa bumi yang tidak mempunyai gempa utama (*main shock*). Gempa bumi tipe ini disebut gempa bumi *swam* dan gempa bumi ini biasanya dalam daerah yang terbatas. Pada umumnya gempa bumi ini terjadi di daerah gunung api dan pada daerah yang struktur mediumnya tidak seragam dengan *stress* yang bekerja terkonsentrasi pada area terbatas.

Gelombang gempa bumi dapat diartikan sebagai gelombang yang disebabkan karena adanya gerakan tanah yang tiba-tiba atau suatu letusan, baik di dalam atau di permukaan bumi. Gelombang ini menyatakan adanya perambatan energi dari pusat gempa atau hiposentrum ke tempat lain di bumi. Gelombang gempa bumi tersebut terdiri dari 2 bagian, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan merupakan gelombang yang merambat di lapisan-lapisan bumi, sedangkan gelombang permukaan merupakan gelombang yang merambat di permukaan bumi. Gelombang badan dapat dibagi menjadi 2, yaitu gelombang primer (*Pressure Wave*) (P) atau gelombang longitudinal atau disebut juga gelombang kompresi. Gelombang primer merupakan gelombang yang gerakan partikelnya searah dengan arah penjaralan gelombang. Gelombang primer ini dicirikan dengan waktu tiba paling awal serta dapat menjalar pada semua fasa medium, yaitu padat, cair, dan gas.



Gambar 2.2. Penjalaran gelombang P (*Pressure wave*)  
(Satriyo, 2010)

Selain gelombang primer, terdapat pula gelombang sekunder (*Shear wave*) (S) atau gelombang transversal yang merupakan gelombang dengan arah gerakan partikelnya tegak lurus dengan arah penjalaran gelombangnya. Gelombang sekunder, dapat dipolarisasi menjadi 2, yaitu gelombang SV (*Shear Vertical*) yang merupakan gelombang sekunder dengan arah gerakan partikelnya vertikal serta gelombang SH (*Shear Horizontal*) yang merupakan gelombang sekunder dengan arah gerakan partikelnya horizontal. (Satriyo, 2010)



Gambar 2.3. Penjalaran gelombang S (*Shear wave*)  
(Satriyo, 2010)

Gelombang primer dicirikan sebagai gelombang yang diteruskan melalui bumi dengan gerakan mendorong dan menarik. Sedangkan gelombang sekunder dicirikan sebagai

gelombang yang diteruskan melalui bumi dengan gerakan memutar. Gerakan dorong-tarik memungkinkan gelombang melaju melalui massa batuan yang lebih cepat dari gerakan memutar, sebab untuk melakukan gerakan memutar, memerlukan waktu yang lama untuk menyelesaikannya. Pada sebagian besar batuan, gelombang yang memiliki gerakan dorong-tarik melaju 1,7 kali lebih cepat daripada gerakan memutar. Hal inilah yang menyebabkan gelombang primer lebih cepat perambatannya dibandingkan gelombang sekunder.

Gelombang permukaan (*surface wave*) yaitu gelombang yang menjalar sepanjang permukaan bumi, yang terdiri dari gelombang *Rayleigh*, gelombang *Love*, dan gelombang *Stoneley*. Gelombang *Rayleigh* (R) yaitu gelombang yang arah gerakan partikelnya adalah *elliptic retrograde*. Gelombang *Love* (L) yaitu gelombang yang terpadu pada permukaan bebas medium berlapis, serta gerakan partikelnya seperti gerakan gelombang SH. Gelombang *Stoneley* yaitu gelombang yang terpadu pada bidang batas antara 2 medium, serta gerakan partikelnya serupa dengan gelombang SV.

Ukuran besar gempa bumi dinyatakan sebagai magnitudo sedangkan besaran gempa bumi adalah Skala Richter (SR). Ada beberapa jenis magnitudo/ besaran gempa bumi, yaitu:

1. Magnitudo gelombang badan (mb), ditentukan berdasarkan jumlah total energi gelombang elastis yang ditransfer dalam bentuk gelombang P dan S.
2. Magnitudo gelombang permukaan (ms), ditentukan berdasarkan jumlah total energi gelombang *Love* (L) dan gelombang *Rayleigh* (R) dengan asumsi hiposenter dangkal (30 km) dan amplitude maksimum terjadi pada periode 20 detik.
3. Moment gempa seismik (Mo), merupakan skala yang menentukan magnitudo suatu gempa bumi menurut momen gempa, sehingga akan didapatkan gambaran deformasi yang disebabkan oleh suatu gempa.

Intensitas adalah besaran yang dipakai untuk mengukur suatu gempa selain menggunakan magnitudo. Intensitas didefinisikan sebagai suatu besarnya kerusakan di suatu tempat akibat gempa bumi. Harga intensitas merupakan fungsi dari magnitudo, jarak ke episenter, lama getaran, kedalaman gempa, kondisi tanah dan keadaan bangunan. Berikut ini merupakan hubungan antara magnitudo dan intensitas gempa:

Tabel 2.1. Hubungan antara magnitudo dan intensitas gempa

Magnitudo (richter)	Intensitas (MMI)	Pengaruh-pengaruh tipikal
$\leq 2$	I – II	Pada umumnya tidak terasa
3	III	Terasa di dalam rumah, tidak ada kersusakan
4	IV – V	Terasa oleh banyak orang, barang-barang bergerak, tidak ada
5	VI – VII	Terjadi beberapa kerusakan struktural, seperti retak-retak pada dinding
6	VII – VIII	Kerusakan menengah, seperti hancurnya dinding
7	IX – X	Kerusakan besar, seperti runtuhnya bangunan
$>8$	XI – XII	Rusak total atau hampir hancur total

(Sumber: Salsabella, 2013)

## 2.2 Struktur Tektonik Pulau Sulawesi

Pulau Sulawesi terletak pada zona pertemuan diantara tiga lempeng besar dunia yaitu pergerakan lempeng Hindia-Australia dari selatan dengan kecepatan rata-rata 7 cm/ tahun, lempeng Pasifik dari arah timur dengan kecepatan sekitar 6 cm/ tahun, dan lempeng Eurasia bergerak relatif pasif ke tenggara  $\pm 3$



sentimetercm/ tahun. Perkembangan tektonik di kawasan Pulau Sulawesi berlangsung sejak zaman Tersier hingga sekarang, sehingga bentuknya yang unik menyerupai huruf “K”, dan termasuk daerah teraktif di Indonesia, serta mempunyai fenomena geologi yang kompleks dan rumit. Sulawesi dalam tektonik global tidak terlepas dari tatanan tektonik Indonesia yang berada pada daerah pertemuan tiga lempeng bumi yang saling berinteraksi satu sama lain. Sehingga menyebabkan Sulawesi menjadi daerah yang berpotensi gempa dan tsunami. Salah satu dari manifestasi pergerakan lempeng adalah pembentukan sesar. Sesar merupakan bidang rekahan yang disertai oleh adanya pergeseran relatif (*displacement*) satu blok terhadap blok batuan lainnya. Dalam rentang waktu geologi, bidang sesarnya mengalami pergeseran mulai dari yang berukuran beberapa sentimeter hingga puluhan kilometer.

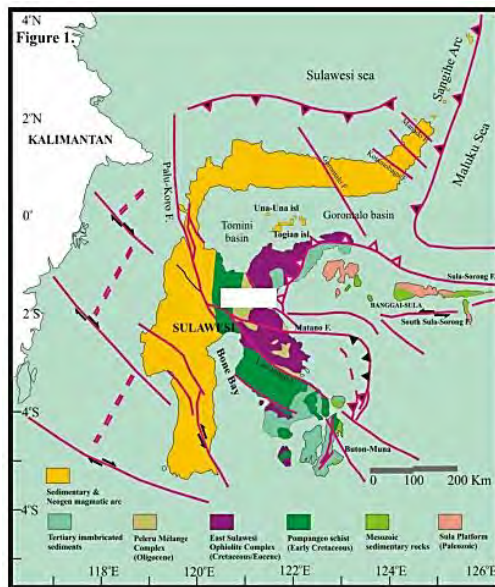
Secara regional, Pulau Sulawesi mendapat tekanan dari luar sehingga terjadi deformasi secara terus menerus yaitu tekanan dari Laut Flores di bagian selatan yang mengaktifkan patahan Palu-Koro dan Walanae, Banggai-Sula dan Laut Banda dari timur mengaktifkan subduksi Laut Sulawesi dan patahan Gorontalo dan aktivitas gunung api di Sulawesi Utara. Sehubungan dengan fenomena tektonik tersebut diatas, maka di kawasan Pulau Sulawesi terdapat empat buah patahan *transcurrent* yaitu Sorong-Matano *transcurrent* yang bersifat *sinistral*, Gorontalo *transcurrent* yang bersifat *dekstral*, Palu-Koro *transcurrent* yang bersifat *sinistral*, dan Walanae *transcurrent* yang bersifat *sinistral*. Keempat patahan tersebut merupakan jalur yang berpotensi sebagai zona rawan gempa dan tsunami.

### 2.3 Sesar Palu-Koro

Sesar Palu-Koro merupakan sesar mendatar (*strike-slip fault*) karena berdekatan dengan jalur pertemuan tiga lempeng, yakni lempeng Eurasia, Indo-australia, dan Pasifik serta lempeng mikro Filipina. Daerah tersebut memiliki aktifitas kegempaan yang cukup tinggi dengan kedalaman dangkal antara 0 hingga 60 km

yang merupakan cerminan pelepasan tegangan kerak bumi yang dipicu oleh aktivitas patahan aktif.

Sesar Palu-Koro memotong Sulawesi bagian barat dan tengah, menerus ke bagian utara sampai Palung Sulawesi Utara yang merupakan batas tepi benua di Laut Sulawesi. Sesar Palu-Koro juga memanjang dari Palu ke arah Selatan dan Tenggara melalui Sulawesi Selatan bagian Utara menuju ke selatan Bone sampai di laut Banda.



Gambar 2.4. Peta tektonik dan struktur Sulawesi  
(Kaharuddin, 2011)

Patahan Palu-Koro memanjang dari utara (Palu) ke selatan (Malili) hingga teluk Bone sepanjang  $\pm 240$  km. Bersifat *sinistral* dan aktif dengan kecepatan sekitar 25-30 mm/ tahun. Patahan Palu Koro berhubungan dengan patahan Matano-Sorong dan Lawanoppo-Kendari, sedang di ujung utara melalui selat

Makassar berpotongan dengan zona subduksi lempeng laut Sulawesi.

## **2.4 Metode *Coupled Velocity-Hypocenter***

Dalam tugas akhir ini digunakan metode *coupled velocity-hypocenter* untuk merelokasi hiposenter gempa bumi serta untuk mendapatkan model kecepatan dan koreksi stasiun dari daerah penelitian, yaitu daerah sekitar Sesar Palu Koro. Data yang dibutuhkan adalah data gempa bumi, model awal kecepatan daerah penelitian serta lokasi stasiun.

Model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan yang digunakan adalah model 1D, hal ini dilakukan sebagai bentuk penyederhanaan masalah terhadap model bawah permukaan sebenarnya. Model kecepatan gelombang seismik 1D biasa digunakan sebagai prosedur dalam penentuan lokasi gempa dan sebagai inisial model untuk seismik tomografi (Kissling, 1995; Kissling *et al.* 1994). Salah satu metode penentuan model kecepatan gelombang seismik 1-D, adalah metode *coupled velocity-hypocenter* menggunakan program VELEST versi 3.1 (10.4.95). Metode *coupled velocity-hypocenter* merupakan metode relokasi gempa, penentuan model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan 1-D, dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger.

Metode *Geiger* ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan atau gelombang S. Anggapan yang digunakan adalah bahwa bumi terdiri dari lapisan datar yang homogen isotropik, sehingga waktu tiba gelombang gempa yang terjadi karena pemantulan dan pembiasan untuk setiap lapisan dapat dihitung. Cara yang digunakan dengan memberikan tebakan awal hiposenter, kemudian dilakukan perhitungan waktu rambat gelombang untuk setiap stasiun yang digunakan. Dari perhitungan tersebut, didapatkan residu, yaitu perbedaan antara waktu rambat gelombang yang terukur (*observed*) dengan waktu rambat gelombang yang dihitung (*calculated*) untuk setiap stasiun.

Selain itu, terdapat pembaruan model kecepatan

menggunakan persamaan *Kissling* (1995). Perolehan model kecepatan yang telah diperbaharui menggunakan persamaan:

$$r = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

$r$  = residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi.

$t_{obs}$  = waktu tempuh observasi;  $t_{cal}$  = waktu tempuh kalkulasi.

$f$  = fungsi terhadap lokasi stasiun ( $s$ ), lokasi hiposenter dan waktu tiba/ *origin time* ( $h$ ), dan model kecepatan ( $m$ )

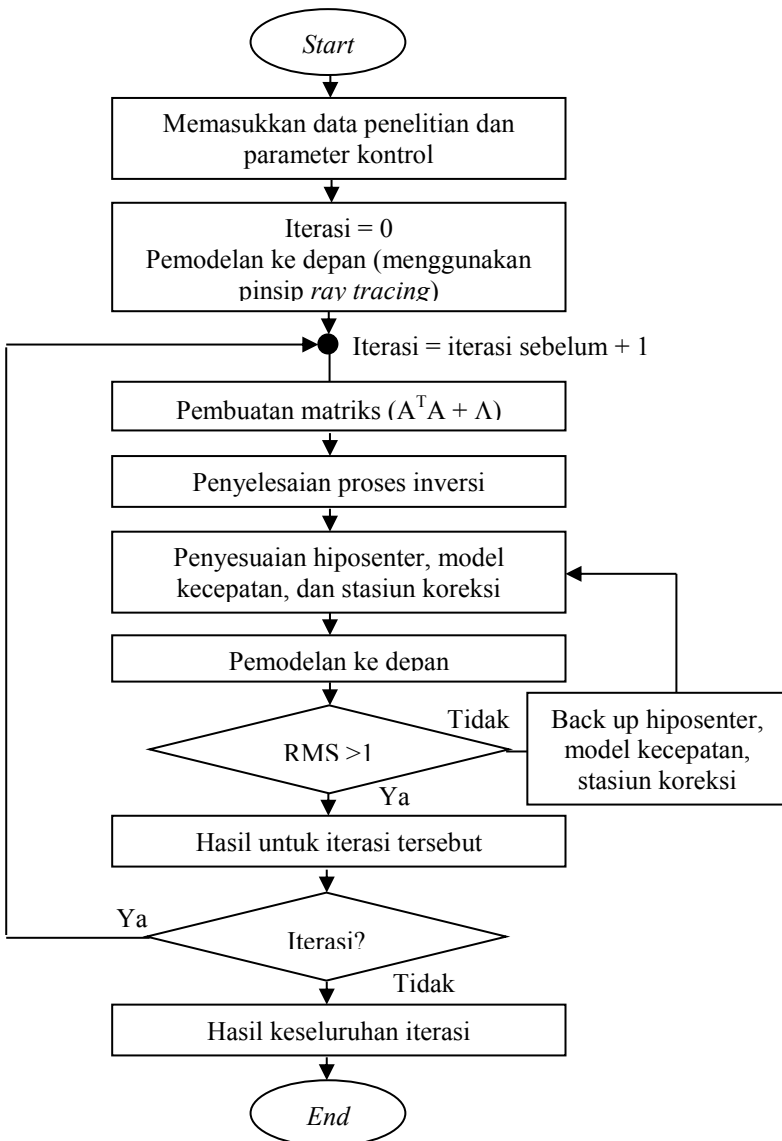
$e$  = koreksi stasiun

$k$  = jumlah hiposenter

$i$  = jumlah stasiun

Dalam tahapan berikutnya, nilai-nilai tersebut digunakan dalam *forward modeling* untuk memperoleh nilai  $t_{cal}$  baru yang akan dibandingkan *misfitnya* dengan  $t_{cal}$  sebelumnya. Tahapan tersebut merupakan tahapan dalam VELEST untuk satu iterasi. Dalam setiap iterasinya, tercantum nilai RMS antara data waktu tempuh observasi dan waktu tempuh perhitungan, sehingga jumlah iterasi dapat diatur hingga memenuhi kriteria RMS yang diharapkan.

*Inverse modeling* dilakukan dengan menyelesaikan Matriks *Damped Least Square* [ $A^T A + L$ ] ( $A$ =Matriks *Jacobi*,  $A^T$ =*Transpose* Matriks *Jacobi*;  $L$ =Matriks *damping*). Penggunaan nilai *damping* akan mempengaruhi nilai perturbasi parameter model ( $\Delta m$ ), dengan hubungan antara besarnya *damping* dan nilai  $\Delta m$  adalah berkebalikan. Hasil dari *inverse modeling* adalah vektor perbaikan parameter model ( $\Delta m$ ) yang selanjutnya diperoleh nilai parameter hiposenter, model kecepatan gelombang seismik 1D, dan koreksi stasiun.



Gambar 2.5. Diagram alir *software* VELEST (Kissling, 1995)

## 2.5 Metode *Local Earthquake Tomography*

Inversi tomografi dengan menggunakan pendekatan linier akan memperoleh solusi persamaan linier yang dinyatakan dalam bentuk matrik

$$[A][x] = [\delta t] \dots\dots\dots(2.2)$$

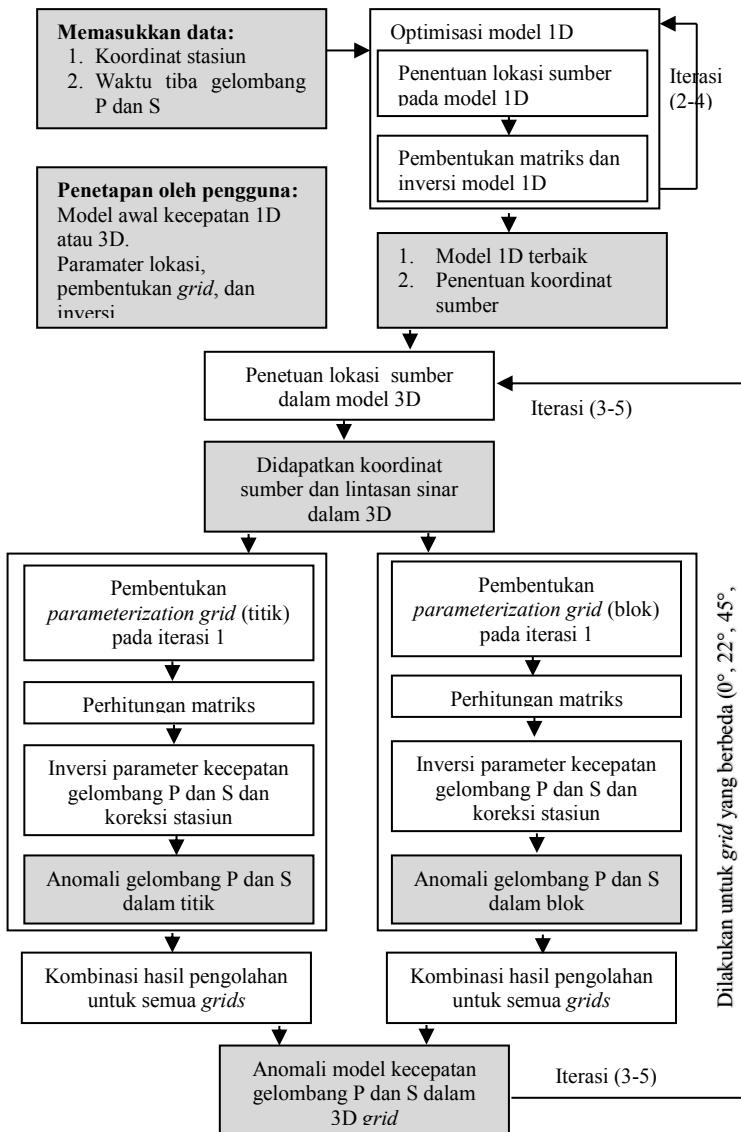
dengan  $[A]$  adalah matriks Kernel ( $m \times n$ ) dan elemen matriksnya berupa panjang sinar di setiap blok,  $[x]$  adalah vektor solusi ( $n \times 1$ ) mempunyai elemen berupa parameter *slowness deviation* atau atenuasi yang akan dicari, dan  $[\delta t]$  merupakan vektor data ( $m \times 1$ ) yang berisi waktu tunda atau waktu tempuh terbobot.

Dalam inversi tomografi biasanya jumlah data waktu tempuh lebih banyak daripada jumlah blok atau bilangan yang tidak diketahui, sehingga persamaan (2.2) di atas merupakan persamaan *over determined* dan matriks  $[A]$  tidak bujur sangkar. Hanya matriks bujur sangkar yang mempunyai invers matriks. Oleh sebab itu, maka matrik  $[A]$  dibuat bujur sangkar dengan cara mengalikan dengan matriks tranposenya

$$[A^T A][x] = [A^T \delta t] \dots\dots\dots(2.3)$$

Sehingga persamaan tersebut menjadi persamaan normal dari persoalan *least square* linier.

Perkiraan solusi dalam persoalan *least square* linier tersebut menggunakan dua jenis *damping* yaitu *explicit damping* dan *implicit damping*. *Explicit damping* ada dua yaitu *minimum norm* dan *gradient damping*. *Gradient damping* memberikan solusi hasil inversi ke suatu model yang *smooth*. Cara kerja *damping* ini adalah dengan menggunakan *roughening matrix*. *Roughening matrix* mengambil selisih harga deviasi *slowness* dari suatu blok dengan blok-blok di sekitarnya. Tujuan penerapan *gradient damping* adalah untuk mendapatkan tomogram yang relatif *smooth* sehingga diharapkan dapat memudahkan dalam interpretasi. Dalam proses inversi dengan pendekatan iteratif, maka jumlah iterasi berlaku sebagai *implicit damping*.



Gambar 2.6. Diagram alir *software* LOTOS  
(Koulakov, 2012)

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data gempa lokal yang menjadi lokasi penelitian yang terkumpul dalam *Phase Report Sheet* (PRS), *software* ArcMap 10.1, *software* VELEST 3.3, *software* LOTOS, *software* Winquake, Microsoft Excel, notepad, dan model kecepatan untuk daerah di sekitar Sesar Palu Koro.

#### **3.2 Proses Pengambilan Data**

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data gempa di daerah Sulawesi, tepatnya untuk sekitar Sesar Palu Koro. Data yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Data *Phase Report Sheet* (PRS) yang didapatkan dari pengumpulan data pada website [webdc.eu/webdc3](http://webdc.eu/webdc3). Dalam data tersebut, terdapat informasi mengenai tanggal kejadian gempa, *origin time*, hiposenter gempa (*latitude*, *longitude*, dan kedalaman), dan magnitudo gempa.
2. Model kecepatan lokasi penelitian, yaitu untuk daerah Sesar Palu Koro.
3. Data stasiun pengamat yang digunakan, meliputi *latitude*, *longitude*, dan ketinggian dari tiap-tiap stasiun.

#### **3.3 Proses Pengolahan Data**

Proses pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### **3.3.1. Pengumpulan data dari PRS**

Data-data PRS yang didapatkan kemudian dipilih. Tujuan dilakukannya pemilihan tersebut adalah untuk mendapatkan data yang hendak diolah sesuai dengan batasan masalah yang ditentukan sebelumnya. Setelah dilakukan pemilihan, data-data yang telah sesuai dengan batasan masalah dikumpulkan pada *file* baru pada Microsoft Excel. Informasi dari data-data yang

diperlukan adalah tanggal kejadian, *origin time*, *latitude*, *longitude*, kedalaman dan magnitudo dari masing-masing *event* gempa bumi.

### 3.3.2. *Picking* gelombang P dan S

Dari data yang sudah terpilih, dilakukan proses selanjutnya yaitu *picking* gelombang P dan S untuk masing-masing *event* gempa bumi. *Picking* dilakukan untuk tiap *waveform* pada masing-masing stasiun pengamat untuk semua *event* gempa bumi yang digunakan dalam penelitian. Kemudian dicatat waktu hasil *picking* gelombang P dan hasil *picking* gelombang S. Dan juga dilakukan pengurangan antara waktu *picking* masing-masing gelombang dengan *origin time*.

### 3.3.3. Penentuan lokasi awal hiposenter

Setelah didapatkan data-data yang akan diolah dan telah sesuai dengan batasan masalah, maka dilakukan proses selanjutnya yaitu *plotting* hiposenter menggunakan *software* ArcMap 10.1. Kemudian dilakukan proses pemilihan kembali untuk hiposenter yang telah *diplot*. Pemilihan dilakukan agar pengolahan difokuskan untuk daerah-daerah di sekitar Sesar Palu Koro dan tidak menyebar. Penyortiran juga dilakukan untuk *file* Excel, sehingga untuk pengolahan selanjutnya digunakan *file* yang terbaru tersebut.

### 3.3.4. Pengolahan data menggunakan VELEST

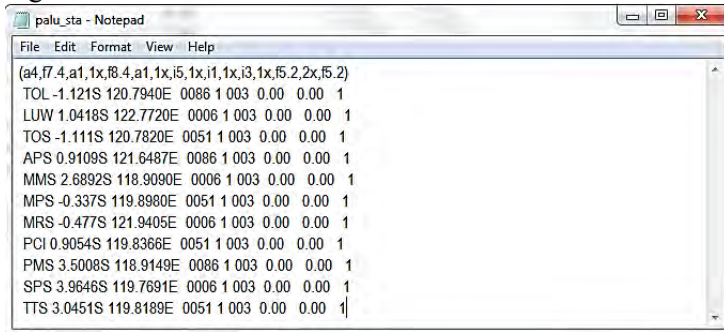
Pada pengolahan data menggunakan *software* VELEST, diperlukan data *input* dengan format *extension file* sebagai berikut:

- \*.cmn adalah kontrol parameter.
- \*.sta adalah list stasiun beserta posisinya.
- \*.mod adalah perkiraan model kecepatan.
- \*.cnv adalah data gempa bumi.

sehingga menghasilkan data *output* sebagai berikut:

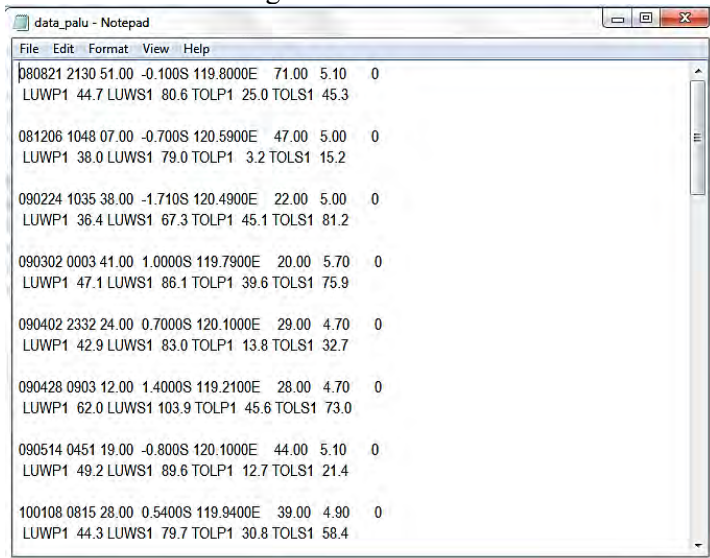
- \*.out (*main-print output*, hiposenter baru hasil relokasi dan *travel time*, koreksi stasiun, serta model kecepatan baru).

Berikut adalah beberapa *file* yang digunakan dalam *software* VELEST, penulisan *input* berupa data berupa lokasi stasiun dengan format \*.sta adalah:



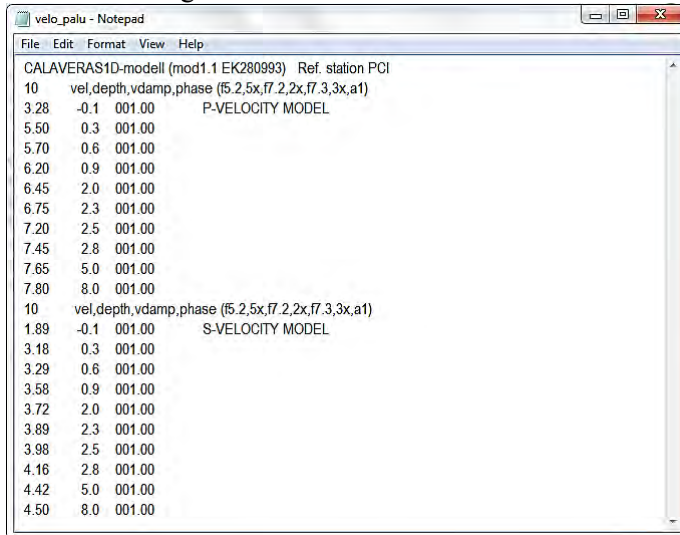
Gambar 3.1. *Input* stasiun dalam *software* VELEST

Sedangkan penulisan *input* berupa data gempa bumi dengan format \*.cnv adalah sebagai berikut:



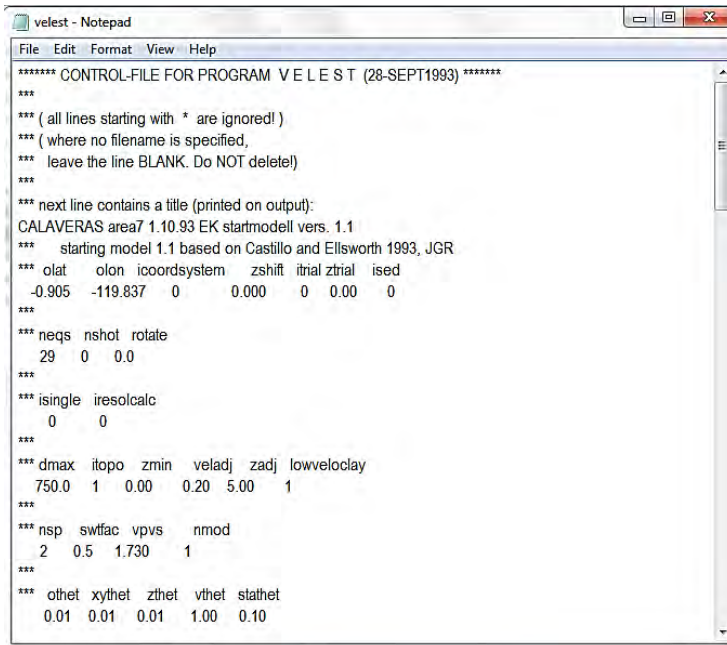
Gambar 3.2. *Input* data gempa bumi dalam *software* VELEST

Untuk selanjutnya adalah *velocity input* yang digunakan dengan format \*.mod sebagai berikut:



Gambar 3.3. *Input velocity model* dalam software VELEST

Dalam VELEST ini terdapat pula parameter kontrol, yang digunakan sebagai tempat pengaturan umum. Format yang digunakan adalah \*.cmn, sebagai berikut:



```

***** CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T (28-SEPT1993) *****
***
*** ( all lines starting with * are ignored! )
*** ( where no filename is specified,
*** leave the line BLANK. Do NOT delete! )
***
*** next line contains a title (printed on output):
CALAVERAS area7 1.10.93 EK startmodell vers. 1.1
*** starting model 1.1 based on Castillo and Ellsworth 1993, JGR
*** olat olon icoordsystem zshift itrial ztrial ised
-0.905 -119.837 0 0.000 0 0.00 0
***
*** neqs nshot rotate
29 0 0.0
***
*** isingle iresolcalc
0 0
***
*** dmax itopo zmin veladj zadj lowveloclay
750.0 1 0.00 0.20 5.00 1
***
*** nsp swtfac vpvs nmod
2 0.5 1.730 1
***
*** othet xythet zthet vthet stathet
0.01 0.01 0.01 1.00 0.10

```

Gambar 3.4. *Input* parameter kontrol dalam *software* VELEST

Dalam VELEST ini diperlukan adanya model awal kecepatan perkiraan atau tebakan awal. Berikut adalah model awal kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 3.1. Model awal kecepatan untuk daerah Sesar Palu-Koro (Azizah, 2014)

Kedalaman (km)	Kecepatan Gelombang P (km/s)
-1.0	3.28
3.0	5.50
6.0	5.70
9.0	6.20
20.0	6.45
23.0	6.75
25.0	7.20
28.0	7.45
50.0	7.65
80.0	7.80

Sedangkan kecepatan gelombang S sesuai dengan persamaan berikut:

$$V_s = \frac{v_p}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (3.1)$$

### 3.3.5. Relokasi posisi hiposenter

Setelah didapatkan hasil *latitude*, *longitude*, dan kedalaman baru, dilakukan kembali proses *plotting* hiposenter menggunakan *software* ArcMap 10.1. Kemudian dilakukan perbandingan antara hiposenter sebelum dan sesudah relokasi. Dan dilakukan analisa terhadap hasil tersebut.

Selain itu, dilakukan perhitungan pula untuk pergeseran yang terjadi, berikut adalah persamaan yang digunakan:

- Pergeseran *latitude* (X)

$$X = \sqrt{(lat_{relokasi} - lat_{awal})^2} \dots \dots \dots (3.2)$$

- Pergeseran *longitude* (Y)

$$Y = \sqrt{(lon_{relokasi} - lon_{awal})^2} \dots \dots \dots (3.3)$$

- Pergeseran *depth* (Z)

$$Z = \sqrt{(dep_{relokasi} - dep_{awal})^2} \dots\dots\dots(3.4)$$

- Besar pergeseran hiposenter (R)

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \dots\dots\dots(3.5)$$

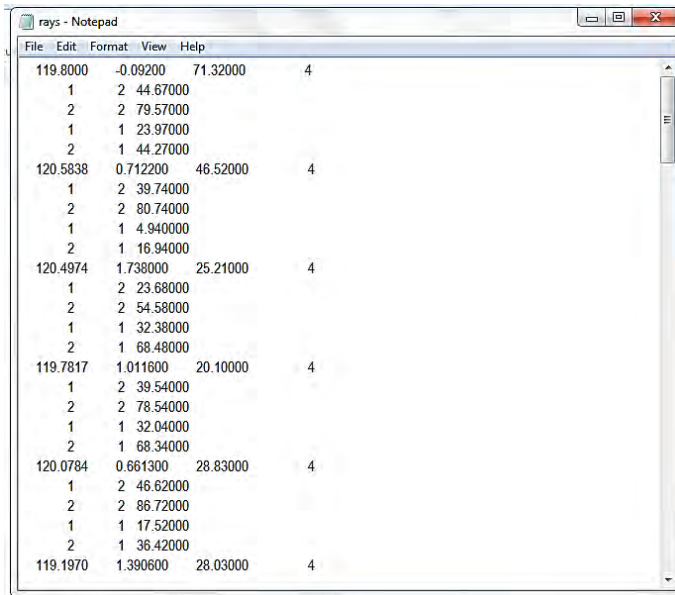
### 3.3.6. Pengolahan data menggunakan LOTOS

Setelah dilakukan pengolahan menggunakan *software* VELEST, model kecepatan baru yang didapatkan tersebut digunakan sebagai *input* dalam metode *Local Earthquake Tomography*. Hasil relokasi (*latitude*, *longitude*, dan kedalaman) gempa bumi menggunakan *software* VELEST digunakan sebagai *input* pula. Metode *Local Earthquake Tomography* ini menggunakan *software* LOTOS dalam pengolahannya.

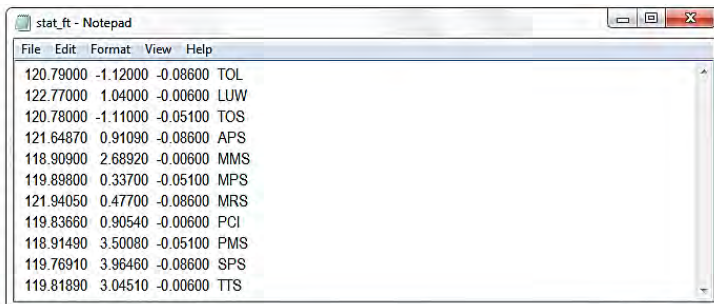
Pada data LOTOS ini diperlukan nilai *input* sebagai berikut :

- \*.dat adalah lokasi gempa hasil relokasi menggunakan VELEST, *list* stasiun beserta posisinya, model kecepatan baru hasil dari VELEST, dan parameter kontrol dalam LOTOS.

Sehingga menghasilkan data *output* berupa gambar kecepatan gelombang P dan S dalam fungsi kedalaman.

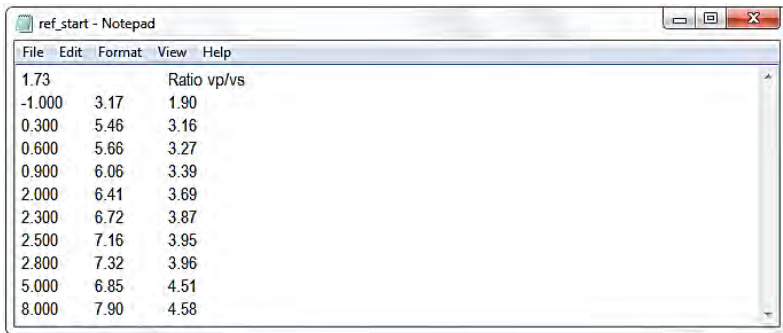


Gambar 3.5. *Input data gempa bumi dalam software LOTOS*



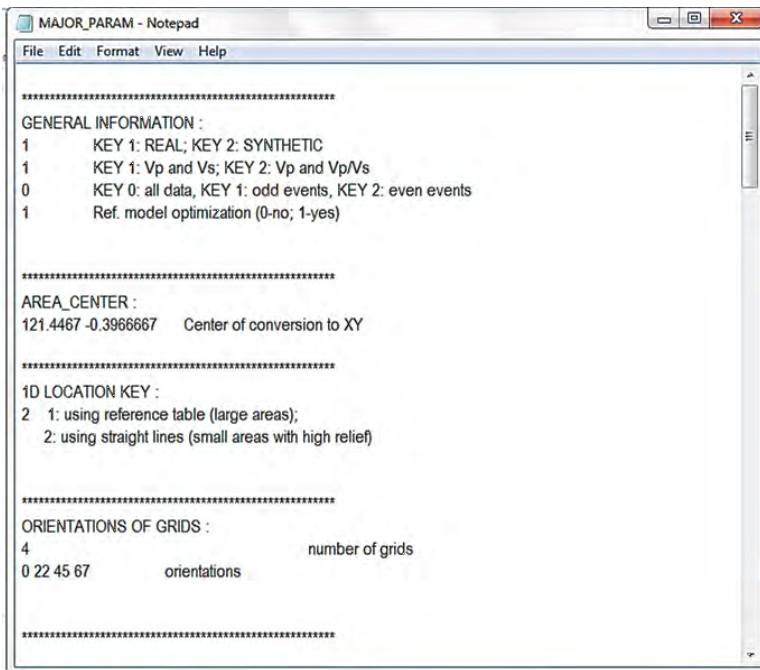
Gambar 3.6. *Input lokasi stasiun dalam software LOTOS*





		Ratio vp/vs
1.73		
-1.000	3.17	1.90
0.300	5.46	3.16
0.600	5.66	3.27
0.900	6.06	3.39
2.000	6.41	3.69
2.300	6.72	3.87
2.500	7.16	3.95
2.800	7.32	3.96
5.000	6.85	4.51
8.000	7.90	4.58

Gambar 3.7. *Input* model kecepatan dalam *software* LOTOS



```

*****
GENERAL INFORMATION :
1      KEY 1: REAL; KEY 2: SYNTHETIC
1      KEY 1: Vp and Vs; KEY 2: Vp and Vp/Vs
0      KEY 0: all data, KEY 1: odd events, KEY 2: even events
1      Ref. model optimization (0-no; 1-yes)

*****
AREA_CENTER :
121.4467 -0.3966667   Center of conversion to XY

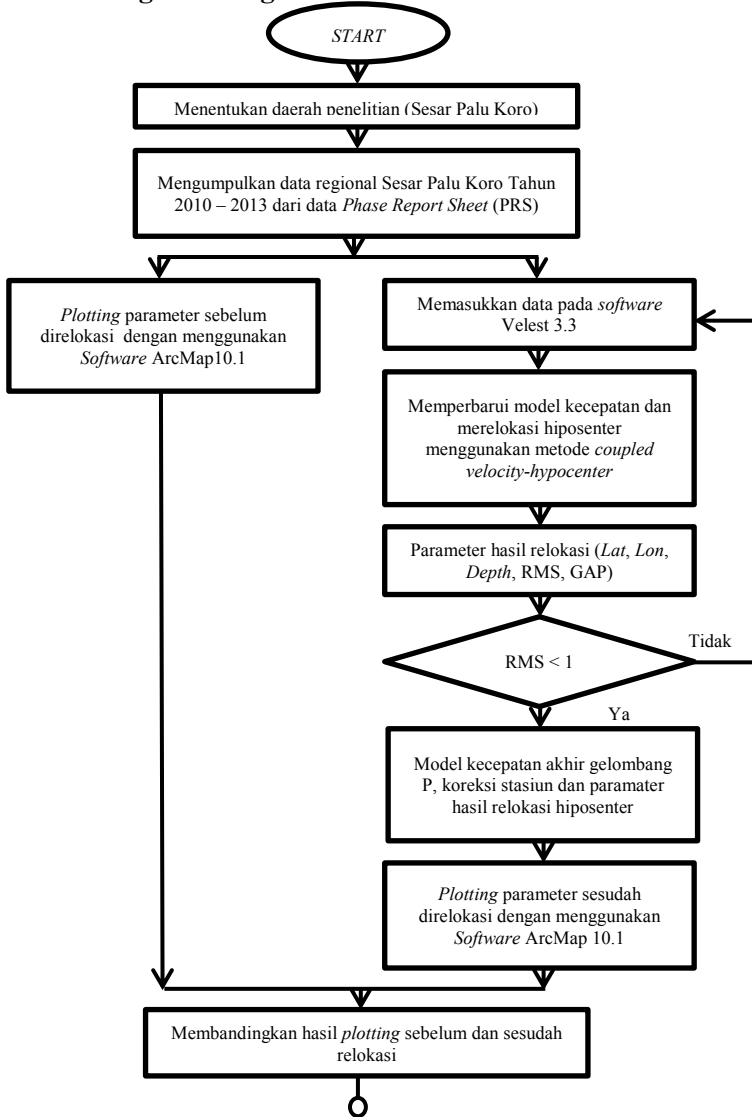
*****
1D LOCATION KEY :
2  1: using reference table (large areas);
   2: using straight lines (small areas with high relief)

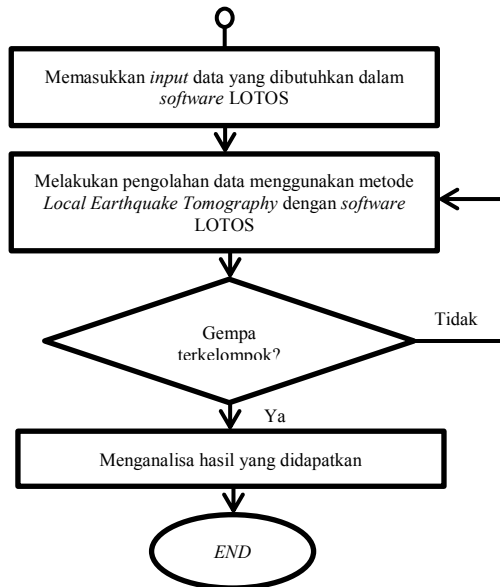
*****
ORIENTATIONS OF GRIDS :
4                                     number of grids
0 22 45 67                       orientations
*****

```

Gambar 3.8. *Input* parameter kontrol dalam *software* LOTOS

### 3.4 Diagram Pengolahan Data





Gambar 3.9. Diagram alir penelitian

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan penelitian menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* dan metode *local earthquake tomography* yang tersusun dalam bab III, pada bab ini akan dijabarkan hasil dari penelitian tersebut.

#### 4.1 Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode *Coupled Velocity-Hypocenter*

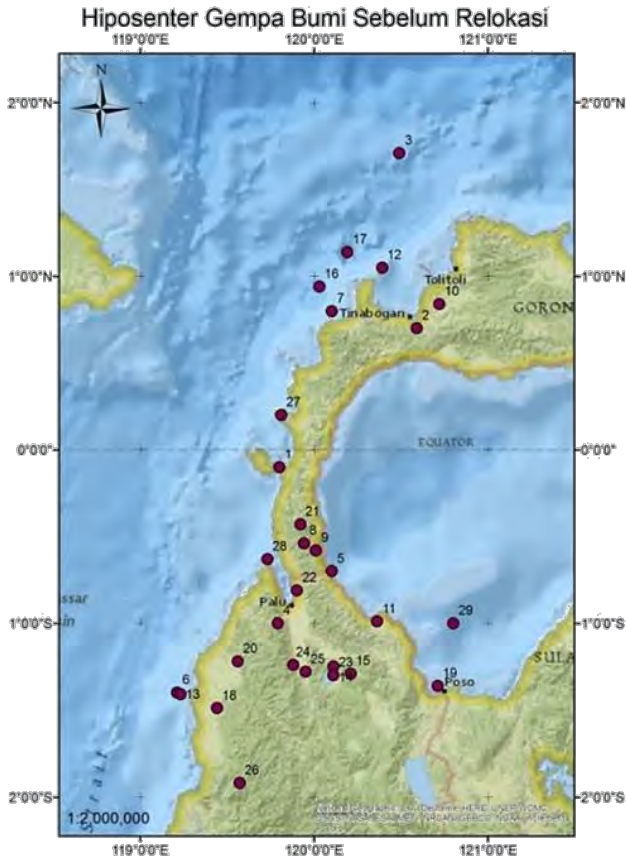
Penelitian ini menggunakan data gempa bumi daerah sekitar Sesar Palu Koro dari tahun 2007 hingga 2013. Data tersebut didapatkan dari *website* [webdc.eu/webdc3](http://webdc.eu/webdc3), dengan jumlah 35 *event* gempa bumi. Namun setelah dilakukan *sorting*, didapatkan 29 *event* gempa bumi. *Sorting* tersebut dilakukan karena literatur untuk model kecepatan daerah Sesar Palu Koro hanya sampai kedalaman 80 kilometer. Sehingga data dengan kedalaman lebih dari 80 kilometer tidak digunakan. Magnitudo gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lebih besar dari 4.7 skala richter. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada tabel A.1 pada halaman lampiran. Sedangkan relokasi hiposenter yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter*. Dalam metode ini, diperlukan beberapa stasiun pengamat yang merekam gempa bumi. Berikut adalah data stasiun yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4.1. Lokasi stasiun pengamat gempa bumi

Stasiun	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
TOLI	1.1210N	120.7940E
LUWI	1.0418S	122.7720E
TOLI2	1.1111N	120.7820E
APSI	0.9109S	121.6487E

MMSI	2.6892S	118.9090E
MPSI	0.3370N	119.8980E
MRSI	0.4770N	121.9405E
PCI	0.9054S	119.8366E
PMSI	3.5008S	118.9149E
SPSI	3.9646S	119.7691E
TTSI	3.0451S	119.8189E

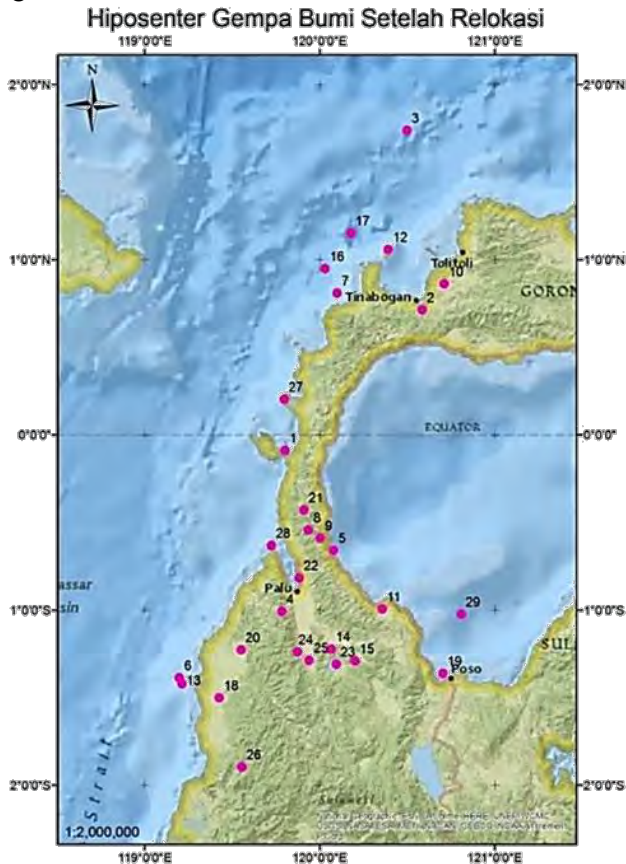
Sebelum relokasi, perlu dilakukan *plotting* untuk mengetahui posisi awal terjadinya gempa bumi, didapatkan hasil pada gambar 4.1. Sebelum direlokasi, persebaran *event* terdapat di daratan Pulau Sulawesi terlihat mengumpul pada daerah tertentu. Selain itu, apabila dilihat pada gambar 4.1 tersebut, terdapat liniasi membentuk garis, berawal dari *event* 28 ke arah tenggara hingga *event* 25. Terbentuk pula liniasi yang berawal dari *event* 1 ke arah tenggara hingga *event* 5. Liniasi-liniasi tersebut membentuk adanya Sesar Palu Koro. Dapat dibandingkan dengan data literatur pada gambar 2.4. Kedalaman gempa sangat beragam, mulai dari kedalaman 5 kilometer hingga 71 kilometer.



Gambar 4.1. Hiposenter gempa bumi sebelum relokasi

Kemudian dari serangkaian data tersebut, diolah dengan metode *coupled velocity-hypocenter* dalam *software* VELEST, didapatkan hasil pada gambar 4.2. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa terjadi pergeseran posisi horizontal baik *latitude* maupun *longitude* dari setiap *event* gempa bumi di daerah Sesar Palu Koro. Selain terjadi perubahan posisi horizontal, juga terjadi perubahan vertikal yaitu kedalaman

gempa bumi. Data hasil relokasi, terdapat pada tabel A.2 pada halaman lampiran. Apabila dibandingkan data sebelum dan sesudah relokasi, sehingga dapat terlihat pergeserannya, dilakukan *plotting* untuk hasil sesudah relokasi dengan data awal sebelum dilakukan relokasi, yang didapatkan hasilnya pada gambar 4.3 berikut.

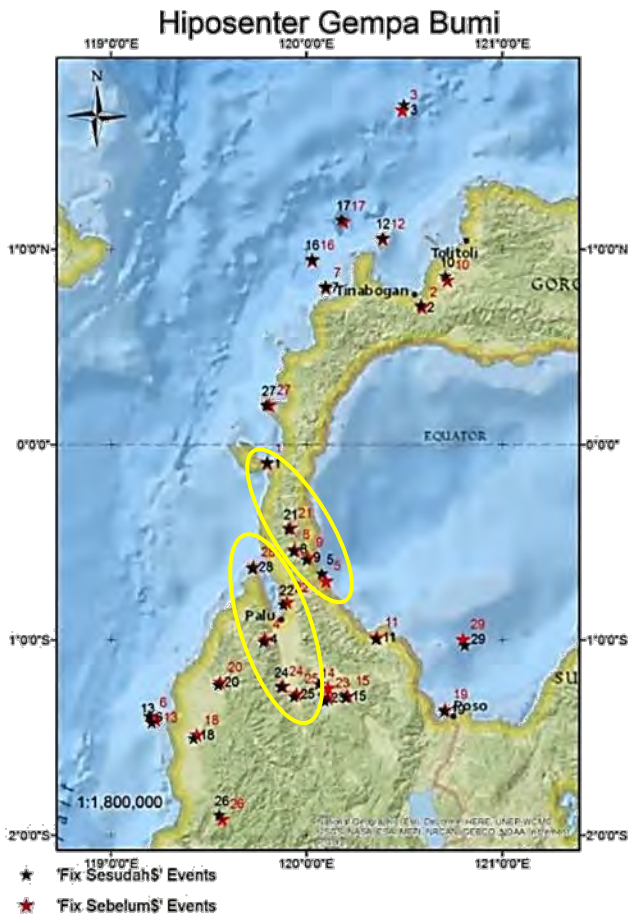


Gambar 4.2. Hiposenter gempa bumi setelah relokasi



Dapat dibandingkan pula lokasi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi, yang terdapat pada gambar 4.3. Dari gambar tersebut, terlihat pergeseran dari lokasi hiposenter gempa bumi. Nilai pergeseran lokasi tersebut terdapat pada tabel A.2 pada halaman lampiran. Nilai pergeseran lokasi tersebut, sangatlah beragam. Pergeseran horizontal mulai terjadi mulai dari 0.71 kilometer hingga 5.69 kilometer. Nilai pergeseran horizontal tersebut, didapatkan dari persamaan 3.5 pada bab 3. Sedangkan pergeseran vertikal yang terjadi adalah 0.01 kilometer hingga 3.21 kilometer. Nilai pergeseran vertikal tersebut didapatkan dari persamaan 3.4 pada bab 3. Pada tabel A.3 pada halaman lampiran, ditampilkan nilai selisih antara sebelum dan sesudah relokasi, untuk *latitude*, *longitude*, dan *depth*. Pada gambar 4.3, distribusi gempa bumi memperlihatkan adanya liniasi dari suatu bidang sesar di bawah permukaan yang sejajar dengan Sesar Palu Koro. Dari liniasi tersebut, lingkaran berwarna kuning, dapat diinterpretasikan bahwa gempa bumi tersebut terjadi karena adanya aktivitas di bawah permukaan.

Perbedaan tersebut terjadi karena dengan dilakukannya relokasi maka lokasi hiposenter gempa bumi menjadi lebih tepat. Hal tersebut didasarkan bahwa dalam penentuan awal lokasi gempa bumi, umumnya menggunakan diagram lingkaran, dimana lokasi hiposenter ditentukan dengan menarik garis dari 3 stasiun yang letaknya berdekatan. Tiga garis tersebut akan menemui satu titik, yang dinyatakan sebagai lokasi hiposenter. Sehingga perlu dilakukan relokasi untuk mendapatkan lokasi yang lebih akurat. Dalam metode *coupled velocity-hypocenter* ini, digunakan model kecepatan bawah permukaan, sehingga lokasi hiposenter menjadi lebih akurat karena digunakan pula kondisi geologi daerah penelitian, yaitu Sesar Palu Koro yang berada di Sulawesi Tengah.



Gambar 4.3 Perbandingan lokasi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi

Aktivitas bawah permukaan yang terjadi di sekitar liniasi Sesar Palu Koro tersebut, terlihat sangat aktif, karena dalam kurun waktu yang singkat, telah terjadi banyak gempa bumi. Sesar Palu Koro berada pada daerah yang aktif bergerak. Pergerakan tersebut karena adanya pengaruh dari tiga

lempeng mayor yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasia, selain itu mendapat desakan pula dari lempeng Filipina.

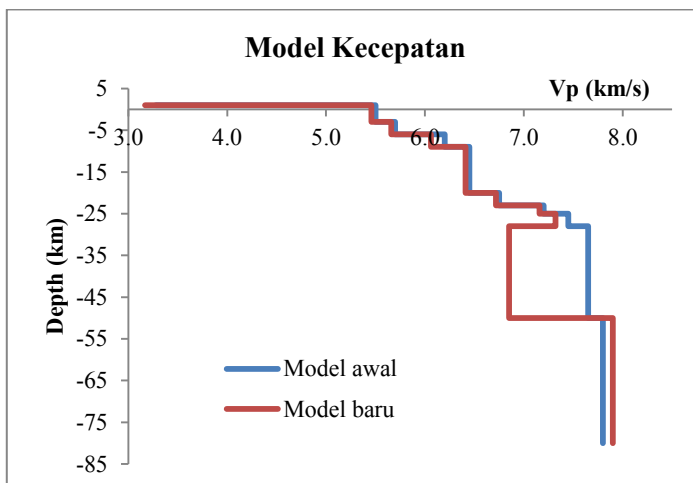
Dalam tabel A.2 terlihat pula kolom RMS atau *Root Mean Square*. Kolom tersebut menyatakan keakuratan suatu penelitian. Nilai RMS tersebut menyatakan selisih antara *travel time* kalkulasi dengan *travel time* observasi. Semakin kecil nilai RMS, maka hasil dari penelitian tersebut dapat dikatakan akurat. Dasar bahwa hasil dari metode ini akurat adalah nilai RMS yang kurang dari 1. Dari penelitian ini, terlihat bahwa nilai RMSnya sangat kecil, yaitu kurang dari 1. Sehingga dapat dikatakan bahwa relokasi hiposenter menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* ini adalah akurat.

Dalam metode ini, selain didapatkan hasil relokasi hiposenter gempa bumi, juga didapatkan model kecepatan baru. Nilai kecepatan yang berbeda antara sebelum dan sesudah relokasi tersebut dikarenakan luas cakupan daerah penelitian yang berbeda. Model kecepatan sebelum relokasi menggunakan referensi dari penelitian selanjutnya, dengan lokasi cakupan *event* gempa bumi yang direlokasi berbeda dengan penelitian ini. Nilai kecepatan gelombang S untuk model awal adalah sesuai dengan persamaan 3.1 pada bab 3. Nilai model kecepatan sebelum dan sesudah relokasi terdapat pada tabel 4.2. Pada kedalaman 25 hingga 45 kilometer, terjadi perbedaan untuk model kecepatannya. Pada kedalaman tersebut, terjadi *low velocity layer*.

Tabel 4.2. Model kecepatan sesudah relokasi

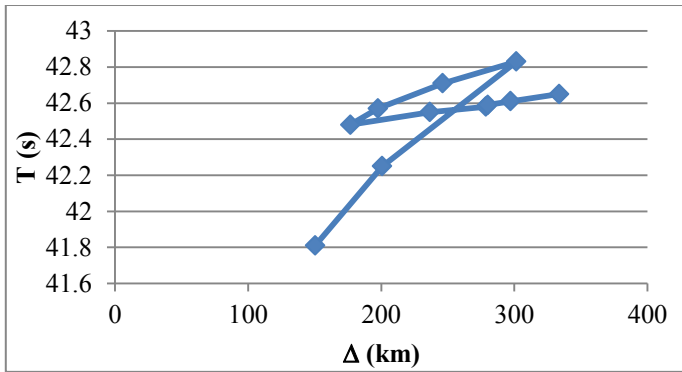
Kedalaman (km)	Kecepatan (km/s)	
	Gel P	Gel S
-1	3.17	1.90
3	5.46	3.16
6	5.66	3.27

9	6.06	3.49
20	6.41	3.69
23	6.72	3.87
25	7.16	3.95
28	7.32	3.96
50	6.85	4.51
80	7.90	4.58



Gambar 4.4. Grafik model kecepatan daerah Sesar Palu Koro

Sebagai validasi adanya *low velocity layer* pada daerah tersebut, dibuat pula kurva waktu tempuh. Hal tersebut dinamakan sebagai efek triplikasi, dimana terdapat 3 titik waktu tempuh untuk satu jarak yang sama. Kurva waktu tempuh yang digunakan adalah untuk 1 gempa besar, yaitu yang terjadi pada tanggal 18 Agustus 2012. Gempa tersebut tercatat oleh 10 stasiun. Efek triplikasi pada penelitian ini terdapat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Efek triplikasi pada kurva waktu tempuh

Selain model kecepatan dan relokasi hiposenter gempa bumi, dari metode ini juga akan didapatkan koreksi stasiun. Koreksi stasiun yang didapatkan dari penelitian ini adalah positif dengan nilai 1.70 detik hingga 1.74 detik, yang terdapat dalam tabel 4.3. Nilai koreksi stasiun memberikan informasi mengenai kandungan tanah yang dilalui oleh gelombang. Pada penelitian didapatkan nilai koreksi positif. Nilai koreksi tersebut, nantinya dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya pada daerah yang sama, dengan cara menambahkan nilai koreksi ke dalam waktu tempuh gelombang P dan gelombang S.

Tabel 4.3. Koreksi stasiun setelah dilakukan relokasi

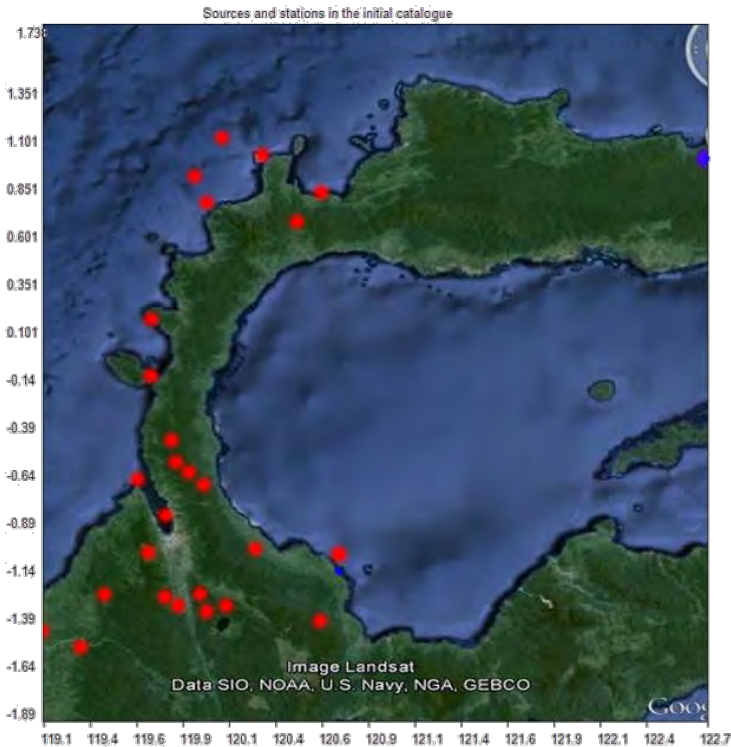
Stasiun	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	Koreksi (detik)
TOLI	1.1210N	120.7940E	1.70
LUWI	1.0418S	122.7720E	1.74
TOLI2	1.1111N	120.7820E	1.74
APSI	0.9109S	121.6487E	1.74
MMSI	2.6892S	118.9090E	1.74
MPSI	0.3370N	119.8980E	1.74

MRSI	0.4770N	121.9405E	1.74
PCI	0.9054S	119.8366E	1.74
PMSI	3.5008S	118.9149E	1.74
SPSI	3.9646S	119.7691E	1.74
TTSI	3.0451S	119.8189E	1.74

#### **4.2 Pengolahan Data Hasil Relokasi Menggunakan Metode *Local Earthquake Tomography***

Setelah dilakukan relokasi dengan menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter*, dilakukan pengolahan data menggunakan metode *local earthquake tomography*. Dari metode ini, diharapkan nantinya dapat diketahui kondisi bawah permukaan dari daerah penelitian. Selanjutnya data hasil relokasi yaitu lokasi hiposenter yang baru, akan di *plot* kan pada tomografi daerah penelitian. Sehingga dapat diketahui apakah lokasi gempa bumi terjadi pada bidang sesar.

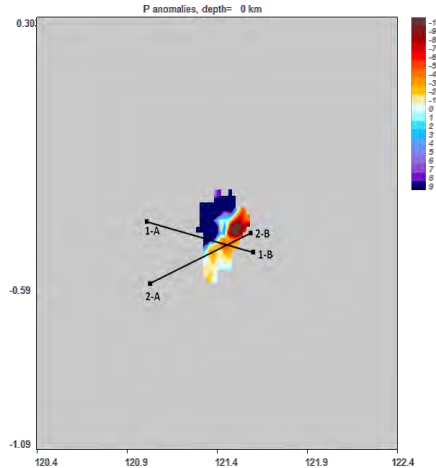
Setelah dimasukkan data-data hasil relokasi menggunakan *software* VELEST, ke dalam format dalam *software* LOTOS. Didapatkan peta awal dalam *processing* menggunakan LOTOS, pada gambar 4.6. Pada gambar tersebut terlihat distribusi gempa bumi yang terjadi di sekitar Sesar Palu Koro, dimana titik merah merupakan lokasi hiposenter dan titik biru merupakan lokasi stasiun pengamat.



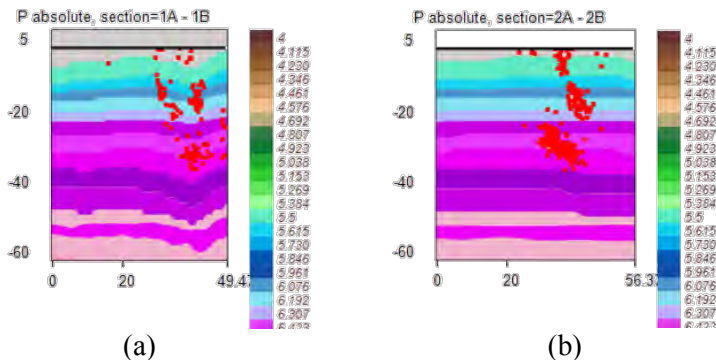
Gambar 4.6. Distribusi sebaran gempa bumi dan stasiun pengamat

Selain gambar 4.6, juga didapatkan hasil yang menggambarkan tomografi dari daerah penelitian. Serta korelasi antara tomografi dengan hiposenter gempa bumi dalam koordinat kedalaman. Berikut adalah hasil tomografi yang didapatkan. Dilakukan *cross section* pada lokasi penelitian, yang sesuai dengan gambar 4.7. Dari gambar 4.8 hingga gambar 4.9 tersebut terlihat adanya distribusi hiposenter yang *tercluster* dalam beberapa kelompok, untuk masing-masing kecepatan gelombang P dan gelombang S. Hal tersebut mengindikasikan adanya sesar pada kedalaman 20

kilometer hingga 40 km. Sesuai dengan hasil pengolahan pada metode *coupled velocity-hypocenter*, yaitu terdapat *low velocity layer* pada kedalaman 25 km hingga 45 km. Dapat diindikasikan bahwa pada kedalaman tersebut, terdapat zona patahan.

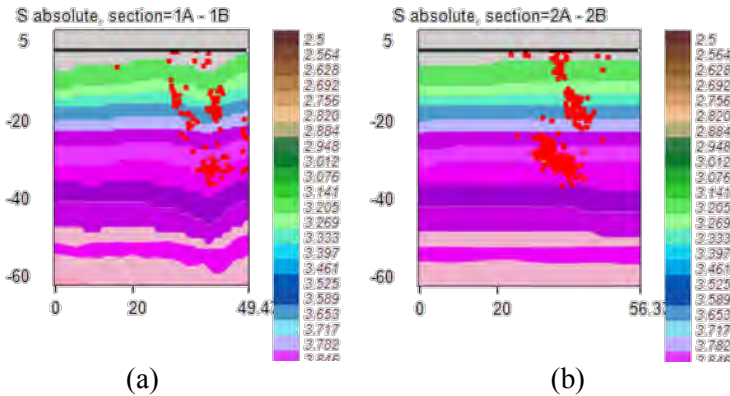


Gambar 4.7. *Cross section* daerah penelitian



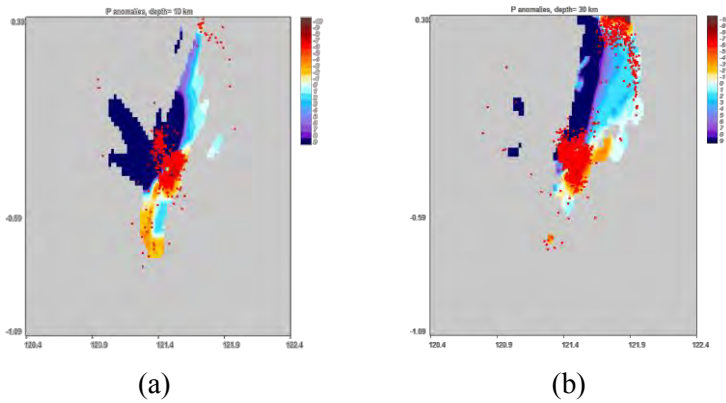
(a) (b)  
Gambar 4.8. Hasil kecepatan gelombang P terhadap kedalaman; (a) *section 1*, (b) *section 2*



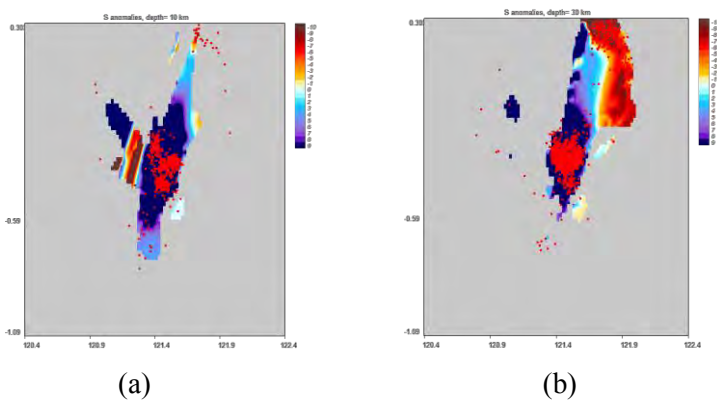


Gambar 4.9. Hasil kecepatan gelombang S terhadap kedalaman; (a) *section 1*, (b) *section 2*

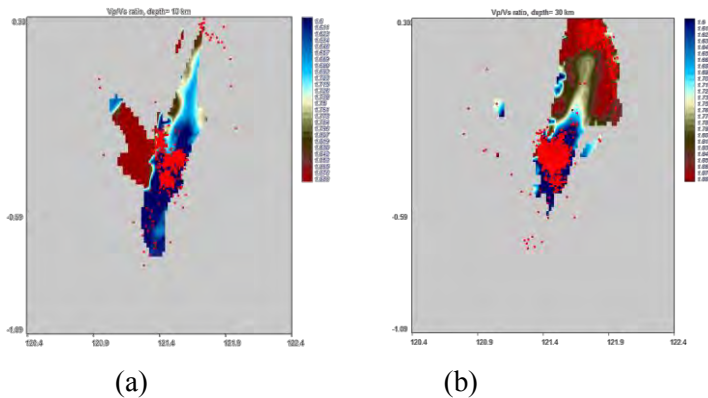
Selain itu, didapatkan pula anomali bawah permukaan yang menyatakan adanya sesar, masing-masing untuk gelombang P, gelombang S, dan  $V_p/V_s$ . Berikut adalah hasil anomali gelombang untuk irisan horizontal pada beberapa kedalaman, yang disajikan dalam gambar 4.10 hingga gambar 4.12. Untuk anomali gelombang P, apabila pada kepadatan sinar gelombang P skala warna menunjukkan nilai negatif, maka pada daerah tersebut dapat diindikasikan sebagai zona patahan. Terlihat pada gambar 4.10, gempa terkelompok pada daerah yang mempunyai skala warna berwarna orange, yang bernilai negatif, sehingga pada daerah tersebut menyatakan terdapatnya zona patahan. Pada kedalaman 30 km, gempa terkelompok dan terdapat pada skala warna orange. Sedangkan untuk anomali  $V_p/V_s$ , apabila pada kepadatan sinar  $V_p/V_s$  skala warna menunjukkan nilai yang rendah, maka pada daerah tersebut diindikasikan dengan zona patahan. Terlihat pula untuk kedalaman 30 kilometer, gempa bumi terkelompok pada skala warna berwarna biru, yang bernilai rendah.



(a) (b)  
Gambar 4.10. Irisan horizontal untuk gelombang P; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km

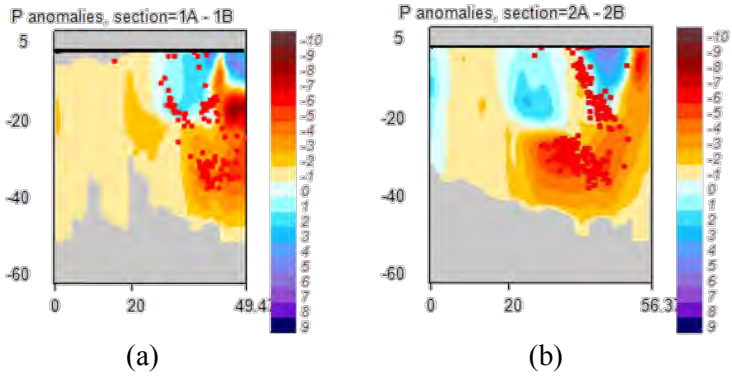


(a) (b)  
Gambar 4.11. Irisan horizontal untuk gelombang S; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km

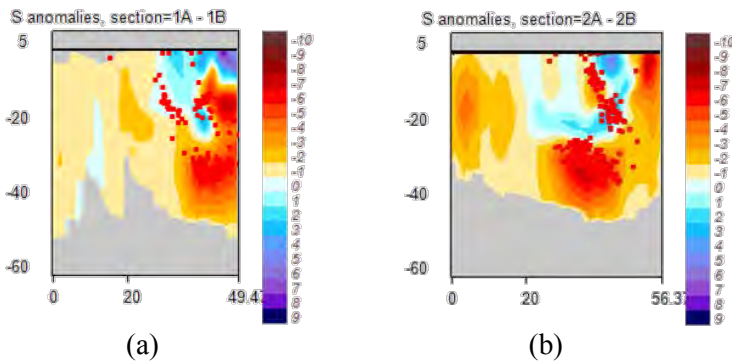


(a) (b)  
Gambar 4.12. Irisan horizontal untuk Vp/Vs; (a) kedalaman 10 km, (b) kedalaman 30 km

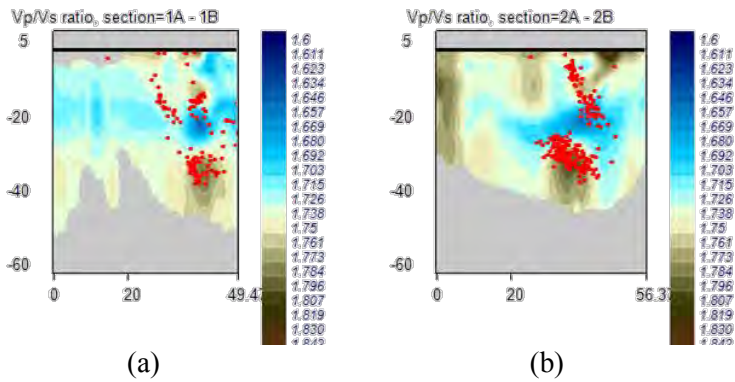
Berikut adalah hasil anomali gelombang untuk irisan vertikal pada beberapa kedalaman, yang disajikan dalam gambar 4.13 hingga gambar 4.15. Sama seperti dengan interpretasi pada irisan horizontal diatas, pada anomali gelombang P dan S, skala warna yang menunjukkan nilai negatif, menyatakan adanya zona patahan pada daerah tersebut. Terlihat bahwa nilai negatif, terdapat pada kedalaman 20 – 40 km, dan gempa bumi terkelompok pada kedalaman sekitar 30 km. Begitu pula untuk anomali Vp/Vs, gempa bumi terkelompok pada kedalaman sekitar 30 km.



Gambar 4.13. Anomali gelombang P; (a) *section 1*, (b) *section 2*



Gambar 4.14. Anomali gelombang S; (a) *section 1*, (b) *section 2*



(a) (b)  
Gambar 4.15. Anomali Vp/Vs; (a) section 1, (b) section 2

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari proses relokasi gempa bumi dan inversi tomografi pada daerah Sesar Palu Koro dengan menggunakan data dari tahun 2007 hingga 2013, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil yang didapatkan dari relokasi menggunakan metode *coupled velocity-hypocenter* adalah terjadi liniasi yang lebih baik dan gempa bumi terkelompok.
2. Hasil yang didapatkan dari metode *local earthquake tomography* adalah distribusi hiposenter gempa bumi secara umum terdapat pada kedalaman 20 – 40 km.

#### **5.2 Saran**

Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan dua metode dalam proses relokasi hiposenter gempa bumi. Sehingga hasil relokasi dari dua metode tersebut dapat dibandingkan. Selain itu, *event* gempa bumi harus terekam minimal oleh 4 stasiun. Serta dapat digunakan untuk mitigasi gempa bumi dari daerah sekitar Sesar Palu Koro.

***”Halaman ini sengaja dikosongkan”***

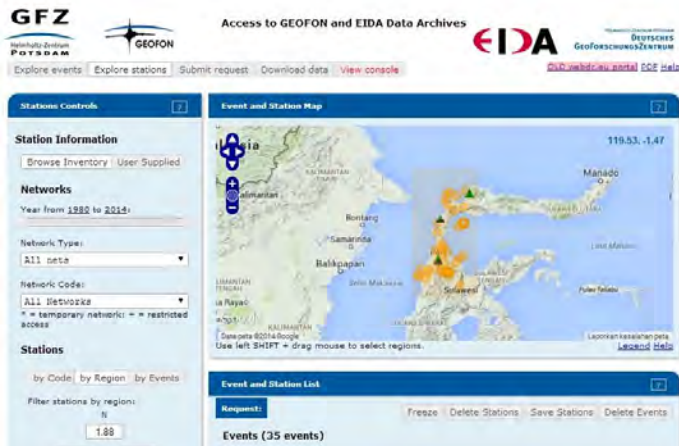


## DAFTAR PUSTAKA

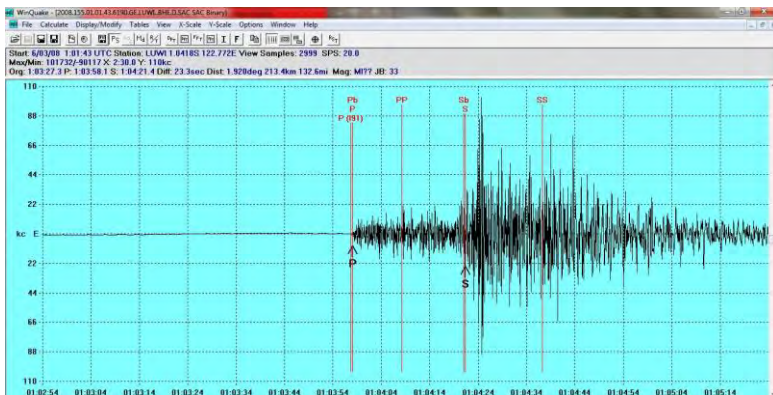
- Budiati, Masyitha Retno dkk. 2012. *Relokasi Gempa di Sepanjang Sesar Palu Koro Menggunakan Metode Modified Joint Hypocenter Determination dan Double Difference*. Prodi Geofisika Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin.
- Daryono. 2011. *Tatanan Tektonik dan Sejarah Kegempaan Palu, Sulawesi Tengah*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Kaharuddin MS, dkk. 2011. *Perkembangan Tektonik dan Implikasinya Terhadap Potensi Gempa dan Tsunami di Kawasan Pulau Sulawesi*. Proceedings Jcm Makassar.
- Kissling, E. 1995. *Program VELEST USER'S GUIDE – Short Introduction*. Institute of Geophysics. ETH Zuerich.
- Koulakov, Ivan. 2012. *Code LOTOS-12 for 3D Tomographic Inversion Based on Passive Seismic Data from Local and Regional Events*. Russia: Institute of Petroleum Geology and Geophysics
- L, Don., Florence., Feet., 2006. *Discovery in Seismology*. Dell Publishing, Co, inc.
- Madrinovella, Iktri dkk. 2012. *Studi Penentuan dan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Sekitar Cekungan Bandung*. Bandung: ITB.
- Rasmid. 2006. *Identifikasi Mekanisme Sumber Gempa Bumi di Selatan Pulau Jawa*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Salomo, Dimas. 2012. *Penentuan Pusat Gempa*. Yogyakarta: UGM.
- Salsabella, Yashinta dan Yuhananisa Prihutami. 2013. *Relokasi Hiposenter Menggunakan Metode Grid Search Gempa Bumi Sigi 6.2 SR 18 Agustus 2012 dan Susulannya*. Jakarta: BMKG.
- Satriyo, Agung. 2010. *Penentuan Anomali Perubahan Kecepatan Gelombang Primer dengan Kecepatan Gelombang Sekunder ( $V_p/V_s$ ) Pada Daerah Papua Barat Studi Kasus*

- Gempa Bumi Manokwari*. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Sianturi, H. L. 2005. *Bahan Ajar Seismologi*. Kupang: Universitas Nusa Cendana.
- Suantika, Gede. 2009. *Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik 3D untuk Delineasi Struktur Internal dan Karakterisasi Sifat Fisis Batuan di Bawah Gunung Api Guntur*. Bandung: ITB.
- [www.bmkg.go.id](http://www.bmkg.go.id)

## Gambar Pendukung dalam Penelitian



Gambar B.1. Sebaran gempa bumi serta lokasi stasiun



Gambar B.2. Contoh *picking* gelombang gempa bumi

***”Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## LAMPIRAN A

### Hasil Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Menggunakan Metode *Coupled Velocity-Hypocenter*

Tabel A 1. Data lokasi awal gempa bumi

<i>Event</i>	<i>Date</i>	<i>Origin Time</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	Magnitudo	<i>Depth (km)</i>
1	21/08/2008	21:30:51	-0.10	119.80	5.10	71
2	06/12/2008	10:48:07	0.70	120.59	5.00	47
3	24/02/2009	10:35:38	1.71	120.49	5.00	22
4	02/03/2009	0:03:41	-1.00	119.79	5.70	20
5	02/04/2009	23:32:24	-0.70	120.10	4.70	29
6	28/04/2009	9:03:12	-1.40	119.21	4.70	28
7	14/05/2009	4:51:19	0.80	120.10	5.10	44
8	08/01/2010	8:15:28	-0.54	119.94	4.90	39
9	17/02/2010	1:49:13	-0.58	120.01	4.70	5
10	18/03/2010	8:36:24	0.84	120.72	5.00	5
11	11/04/2010	15:17:10	-0.99	120.36	4.70	10
12	24/04/2010	11:28:37	1.05	120.39	4.80	5
13	09/05/2010	11:38:49	-1.41	119.23	4.90	10

14	12/05/2010	23:07:53	-1.25	120.11	5.00	10
15	16/05/2010	3:56:03	-1.29	120.21	4.90	10
16	12/06/2010	3:50:02	0.94	120.03	5.00	62
17	12/06/2010	4:41:52	1.14	120.19	4.70	44
18	16/06/2010	0:53:00	-1.49	119.44	5.20	10
19	24/07/2010	23:51:15	-1.36	120.71	5.00	41
20	19/12/2011	1:23:24	-1.22	119.56	5.50	10
21	08/02/2012	8:52:25	-0.43	119.92	4.89	10
22	19/03/2012	5:04:57	-0.81	119.90	4.76	10
23	18/08/2012	9:41:52	-1.30	120.11	6.30	10
24	18/08/2012	9:58:11	-1.24	119.88	4.85	10
25	18/08/2012	13:47:51	-1.28	119.95	4.74	10
26	04/09/2012	13:38:54	-1.92	119.57	4.75	14
27	30/04/2013	10:33:05	0.20	119.81	5.42	32
28	30/06/2013	1:46:25	-0.63	119.73	4.89	10
29	30/09/2013	11:46:10	-1.00	120.80	4.70	31



Tabel A 2. Hasil relokasi gempa bumi

<i>Event</i>	<i>Date</i>	<i>Origin Time</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Depth (km)</i>	<i>RMS</i>	<i>Pergeseran horizontal (km)</i>	<i>Pergeseran vertikal (km)</i>
1	21/08/2008	21:30:51	-0.0920	119.8000	71.32	0.106	0.89	0.32
2	06/12/2008	10:48:07	0.7122	120.5838	46.52	0.232	1.52	0.48
3	24/02/2009	10:35:38	1.7380	120.4974	25.21	0.406	3.21	3.21
4	02/03/2009	0:03:41	-1.0116	119.7817	20.10	0.665	1.58	0.10
5	02/04/2009	23:32:24	-0.6613	120.0784	28.83	0.292	4.92	0.17
6	28/04/2009	9:03:12	-1.3906	119.1970	28.03	0.420	1.78	0.03
7	14/05/2009	4:51:19	0.8080	120.0970	43.77	0.618	0.95	0.23
8	08/01/2010	8:15:28	-0.5464	119.9346	39.20	0.604	0.93	0.20
9	17/02/2010	1:49:13	-0.5907	120.0018	3.96	0.869	1.50	1.04
10	18/03/2010	8:36:24	0.8609	120.7107	4.28	0.911	2.54	0.72
11	11/04/2010	15:17:10	-0.9971	120.3552	10.01	0.237	0.95	0.01
12	24/04/2010	11:28:37	1.0564	120.3903	4.80	0.443	0.71	0.20
13	09/05/2010	11:38:49	-1.4242	119.2114	10.02	0.271	2.60	0.02
14	12/05/2010	23:07:53	-1.2260	120.0647	10.43	0.888	5.69	0.43
15	16/05/2010	3:56:03	-1.2937	120.2007	10.01	0.777	1.11	0.01

16	12/06/2010	3:50:02	0.9482	120.0295	61.44	0.446	0.91	0.56
17	12/06/2010	4:41:52	1.1497	120.1773	44.31	0.387	1.77	0.31
18	16/06/2010	0:53:00	-1.5044	119.4249	10.02	0.145	2.32	0.02
19	24/07/2010	23:51:15	-1.3661	120.7028	41.24	0.093	1.05	0.24
20	19/12/2011	1:23:24	-1.2318	119.5493	10.02	0.122	1.77	0.02
21	08/02/2012	8:52:25	-0.4326	119.9083	10.02	0.243	1.33	0.02
22	19/03/2012	5:04:57	-0.8201	119.8816	10.03	0.569	2.33	0.03
23	18/08/2012	9:41:52	-1.3127	120.0928	10.03	0.115	2.37	0.03
24	18/08/2012	9:58:11	-1.2417	119.8724	10.01	0.578	0.86	0.01
25	18/08/2012	13:47:51	-1.2898	119.9381	10.02	0.074	1.71	0.02
26	04/09/2012	13:38:54	-1.8989	119.5547	13.99	0.355	2.89	0.01
27	30/04/2013	10:33:05	0.2002	119.7963	32.24	0.423	1.52	0.24
28	30/06/2013	1:46:25	-0.6352	119.7232	10.01	0.172	0.95	0.01
29	30/09/2013	11:46:10	-1.0283	120.8075	31.30	0.136	3.25	0.30



Tabel A.3. Perbandingan *latitude*, *longitude*, dan *depth* hiposenter gempa bumi sebelum dan sesudah relokasi

Event	Date	Sebelum			Sesudah		
		<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Depth</i> (km)	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Depth</i> (km)
1	21/08/2008	-0.1000	119.8000	71.00	-0.0920	119.8000	71.32
2	06/12/2008	0.7000	120.5900	47.00	0.7122	120.5838	46.52
3	24/02/2009	1.7100	120.4900	22.00	1.7380	120.4974	25.21
4	02/03/2009	-1.0000	119.7900	20.00	-1.0116	119.7817	20.10
5	02/04/2009	-0.7000	120.1000	29.00	-0.6613	120.0784	28.83
6	28/04/2009	-1.4000	119.2100	28.00	-1.3906	119.1970	28.03
7	14/05/2009	0.8000	120.1000	44.00	0.8080	120.0970	43.77
8	08/01/2010	-0.5400	119.9400	39.00	-0.5464	119.9346	39.20
9	17/02/2010	-0.5800	120.0100	5.00	-0.5907	120.0018	3.96
10	18/03/2010	0.8400	120.7200	5.00	0.8609	120.7107	4.28
11	11/04/2010	-0.9900	120.3600	10.00	-0.9971	120.3552	10.01
12	24/04/2010	1.0500	120.3900	5.00	1.0564	120.3903	4.80
13	09/05/2010	-1.4100	119.2300	10.00	-1.4242	119.2114	10.02
14	12/05/2010	-1.2500	120.1100	10.00	-1.2260	120.0647	10.43

15	16/05/2010	-1.2900	120.2100	10.00	-1.2937	120.2007	10.01
16	12/06/2010	0.9400	120.0300	62.00	0.9482	120.0295	61.44
17	12/06/2010	1.1400	120.1900	44.00	1.1497	120.1773	44.31
18	16/06/2010	-1.4900	119.4400	10.00	-1.5044	119.4249	10.02
19	24/07/2010	-1.3600	120.7100	41.00	-1.3661	120.7028	41.24
20	19/12/2011	-1.2200	119.5600	10.00	-1.2318	119.5493	10.02
21	08/02/2012	-0.4300	119.9200	10.00	-0.4326	119.9083	10.02
22	19/03/2012	-0.8100	119.9000	10.00	-0.8201	119.8816	10.03
23	18/08/2012	-1.3000	120.1100	10.00	-1.3127	120.0928	10.03
24	18/08/2012	-1.2400	119.8800	10.00	-1.2417	119.8724	10.01
25	18/08/2012	-1.2800	119.9500	10.00	-1.2898	119.9381	10.02
26	04/09/2012	-1.9200	119.5700	14.00	-1.8989	119.5547	13.99
27	30/04/2013	0.2000	119.8100	32.00	0.2002	119.7963	32.24
28	30/06/2013	-0.6300	119.7300	10.00	-0.6352	119.7232	10.01
29	30/09/2013	-1.0000	120.8000	31.00	-1.0283	120.8075	31.30

## BIODATA PENULIS



Maria Fransisca Gracynthia lahir di Surabaya, 17 Januari 1993, anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Maksimus Kemagi (50) dan Agnes Budiarni Kusumastutik (43). Penulis menempuh pendidikan formal di TK Katolik Kristus Raja Surabaya, SD Katolik Santa Theresia I Surabaya (1999-2005), SMP Katolik Santa Agnes Surabaya (2005-2008), SMA Negeri 2 Surabaya (2008-2011). Kemudian Penulis diterima di Perguruan Tinggi Jurusan Fisika ITS lewat jalur

SNMPTN. Penulis sempat aktif dalam kampus Himpunan Mahasiswa Fisika ITS (HIMASIKA ITS) menjabat sebagai staf departemen Riset dan Teknologi. Selain itu Penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium Fisika Madya pada semester 5 dan 6. Untuk keterangan lebih jelas mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email : [mfransisca17@gmail.com](mailto:mfransisca17@gmail.com)

***"Halaman ini sengaja dikosongkan"***